TURING 图灵电子与电气工程丛书

ELSEVIER 爱思唯尔

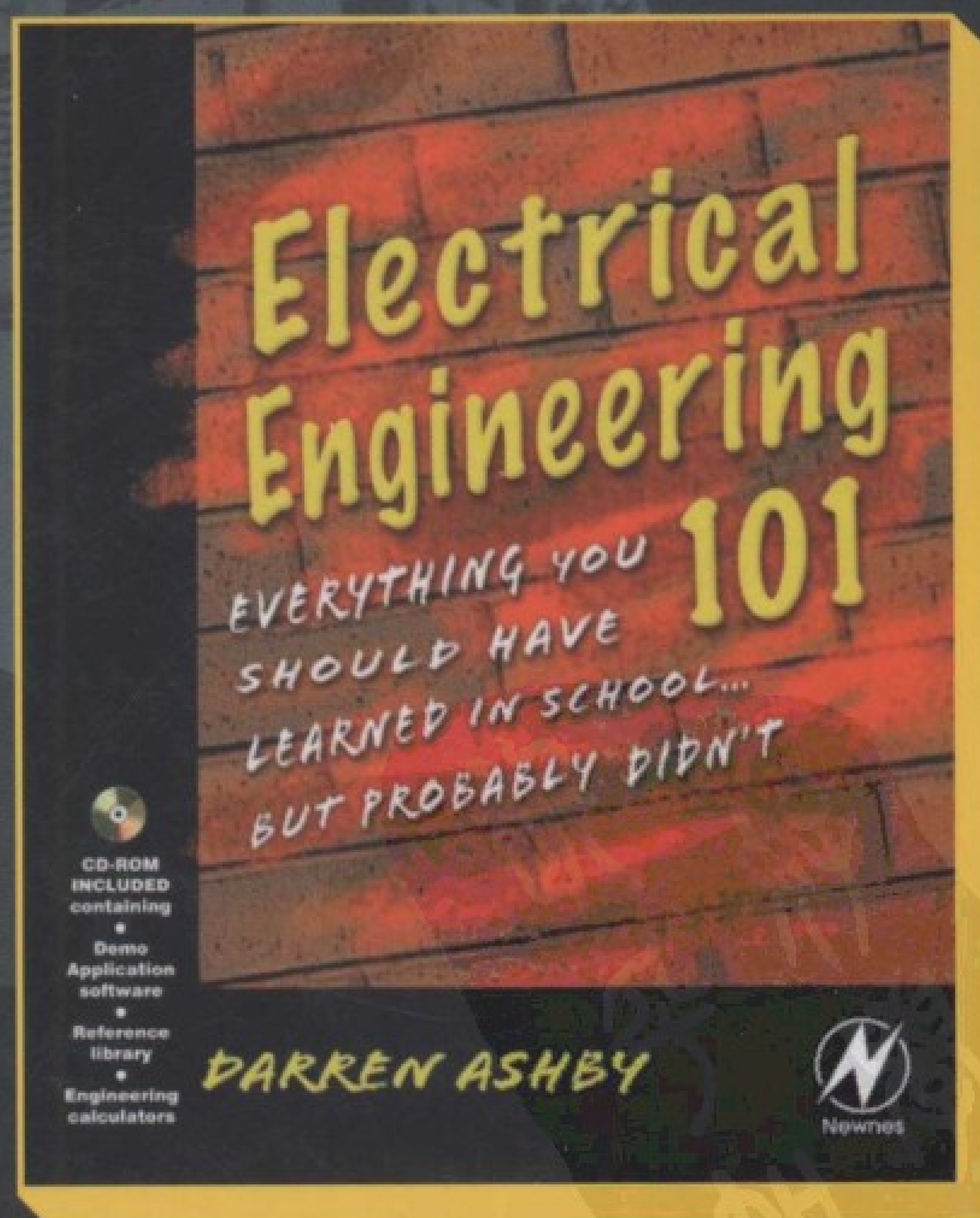
电子电气工程师必知必会

Electrical Engineering 101

Everything You Should Have Learned in School but Probably Didn't

[美] Darren Ashby 著

尹华杰 等译



教会你大学里学不到而工作中至关重要的知识和技能



人民邮电出版社

POSTS & TELECOM PRESS

Electrical Engineering 101
Everything You Should Have Learned in School but Probably Didn't

电子电气工程师必知必会

"作者强调大局观和直觉，从实际出发，这对于我们这些专业人员有着不可估量的重要性。强烈推荐本书。"

——Rick Nelson，*Test & Measurement World*杂志主编

"本书弥补了学校教育的缺陷。多么希望我上学的时候就能掌握这些诀窍！"

——Amazon.com

成为一名合格的电子电气工程师难么？

众所周知，电子电气工程师需要掌握的知识和技能之多之广，所面对的问题之复杂，的确让人望而生畏。然而，曾经被大学老师建议转专业，如今却成为世界知名电子工程专家和高级经理，本书作者Darren Ashby用自己的经历回答："并没有那么难！"他敏锐地指出，目前许多学生和从业人员之所以面对挑战疲于应付，很大程度上是因为学校教育的错误方法所导致的基础不牢、缺乏至关重要的直觉和解决问题的技巧和能力。他深感用一本全面的参考书来填补学校理论与工作实践之间的鸿沟已经迫在眉睫。

本书就是作者交出的答卷。书中的语言妙趣横生，覆盖了广泛的主题：电路与信号的直觉分析法，电气元件的直观理解，电路、电磁场和控制基本理论的重认识，从半导体器件、运放、逻辑器件到微处理器各种基本元件实用阐释，数模转换、电机、电源和可靠性设计，示波器、万用表和电烙铁的正确使用，数字电路、模拟电路的故障排查，还有至关重要的人际沟通技巧……

作者在讲解问题时处处从实际需要出发，善用图表和比喻化繁为简，并通过故事和自己的亲身经历和体会，使枯燥的知识变得生动有趣，章节后都有提纲挈领的"经验法则"总结最重要的概念，再次加深你的印象。阅读本书，你一定会难以释卷，欲罢不能，在轻松的氛围中，深入理解那些被学校教学计划遗漏了的或者你已经淡忘了的关键知识。而这些，正是电子电气工程专业每个学生、工程师、经理乃至每个教师应对日常的各种挑战都需要的。书中字里行间闪烁着的真知灼见，不仅促使你改变对电子电气工程专业的总体思考方式，更有可能使你职业生涯的轨迹从此不同。

Darren Ashby 资深电子工程师和管理者，从事工程设计和管理工作已近20年。现任世界最大的健身器材企业ICON Fitness公司（也是世界最大的嵌入式芯片用户之一）的电子产品线经理。毕业并曾任教于犹他州立大学。他也是业界活跃的技术专家，曾长期担任chipcenter.com等媒体的专栏作者。除本书外，他还与人合著了*Circuit Design: Know It All*一书。

尹华杰 华中理工大学电气工程系博士（1994年），美国伊利诺伊大学（UIUC）电磁计算中心（CCEM）访问学者（1999年-2000年），华南理工大学电气工程系副教授。主要从事电气传动控制、电力电子及工程电磁场数值计算等方向的科研与教学工作。曾主持完成国家自然科学基金一项、广东省自然科学基金一项，目前正主持"基于等效超级电容观念的能量回馈型动态负荷群的性能分析与协调控制"的国家自然科学基金项目。译著有《开关电容电路：从入门到精通》、《开关电源仿真——PSpice和SPICE3应用》、《应用电磁学基础》等。

本书译自原版*Electrical Engineering 101: Everything You Should Have Learned in School but Probably Didn't*，并由Elsevier授权出版。







本书相关信息请访问：图灵网站 http://www.turingbook.com
读者/作者热线：(010) 88593802
反馈/投稿/推荐信箱：contact@turingbook.com

分类建议 电子技术

人民邮电出版社网址 www.ptpress.com.cn

ISBN 978-7-115-18862-5/TN
定价：39.00 元

TURING 图灵电子与电气工程丛书

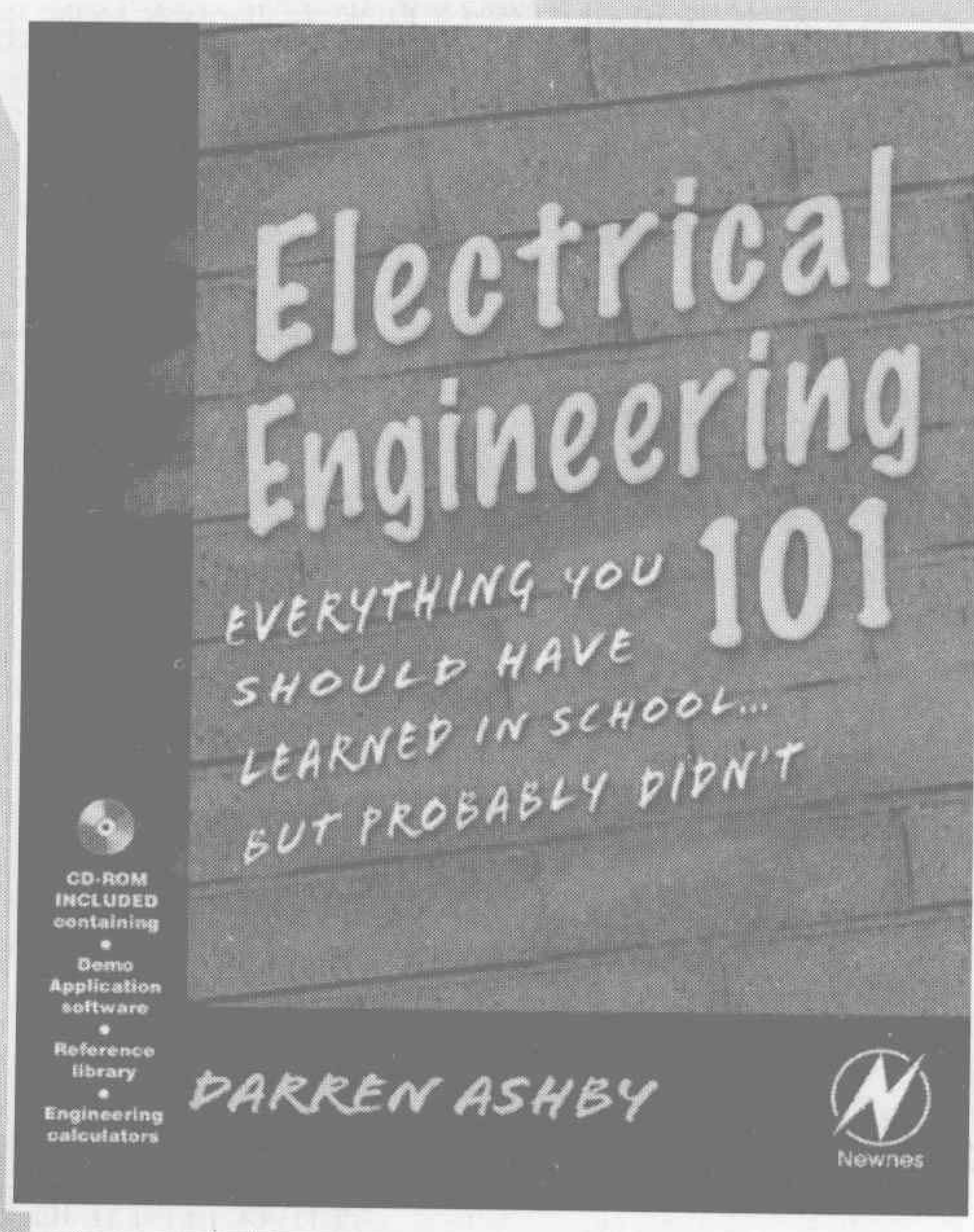
电子电气工程师必知必会

Electrical Engineering 101

Everything You Should Have Learned in School but Probably Didn't

[美] Darren Ashby 著

尹华杰 等译



人民邮电出版社

北 京

图书在版编目（CIP）数据

电子电气工程师必知必会 / （美）阿什比（Ashby，D.）著；尹华杰等译.—北京：人民邮电出版社，2009.1
（图灵电子与电气工程丛书）
书名原文：Electrical Engineering 101：Everything You Should Have Learned in School,but Probably Didn't）
ISBN 978-7-115-18862-5

Ⅰ. 电… Ⅱ. ①阿… ②尹… Ⅲ. ①电子技术—高等学校—教材②电气工程—高等学校—教材 Ⅳ. TN TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 142073 号

内容提要

本书从实际工作需要出发，对一名现代电子电气工程师在日常工作中最为关键的知识点进行了总结，从简单的R、L、C元件，到复杂的运放、微处理器/微控制器、数模/模数转换器、电机、电源，再到元件的非理想性、电路的可靠性设计、仿真、焊接，以及电路和软件的故障处理等等，文字生动幽默。此外，本书还以较大的篇幅，介绍了作者作为研发部门的管理者，在人际沟通、管理等方面的心得体会。

本书既可供电气信息类专业的高校师生参考，也适合电气工程师阅读。

图灵电子与电气工程丛书

电子电气工程师必知必会

◆ 著　[美] Darren Ashby
译　尹华杰　等
责任编辑　舒　立
执行编辑　马晓燕

◆ 人民邮电出版社出版发行　北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编　100061　电子函件　315@ptpress.com.cn
网址　http://www.ptpress.com.cn
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本：700×1000　1/16
印张：14.75
字数：273 千字　2009 年 1 月第 1 版
印数：1 – 4 000 千字　2009 年 1 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号　图字：01-2008-3335 号

ISBN 978-7-115-18862-5/TN

定价：39.00 元

读者服务热线：(010)88593802　印装质量热线：(010)67129223
反盗版热线：(010)67171154

译者序

本书不是严格意义上的专业书，而是一位资深电子电气工程师及技术开发部门的管理者，从个人经验的角度写出的心得体会，它能够帮助读者强化电子电气工程的专业基础，指导读者进行科研开发、项目管理、人际沟通。

本书的作者在自己的科研和管理工作以及在人员招聘的过程中，看到有太多的电子电气工程专业的学生及工程师，由于没有打牢基础知识而常常碰壁，所以萌生了写作本书的念头。如果去问问那些已经毕业很多年的工程师们，我猜想，记不准并联电阻的求法、记不准滑动摩擦的定义者，恐怕也大有人在。因此，为电子电气工程专业的学生、工程师乃至老板们提供一本可以巩固本学科基础知识的读本，是十分必要的。

电子电气工程中的概念看不到、摸不着，其中的公式、原理比较抽象难懂。我在读中学的时候，曾经有这么一个想法："如果有这样的作家，能够把我们学生要学的公式和原理，写成学生们爱读、读起来轻松愉快的类似小说的读本，或者干脆就把这些知识巧妙、有机地融合在一本小说里，让我们在读小说、看故事的时候，顺便就把这些难懂、难记、难学的知识学会了，那该有多好。"我不敢说Darren Ashby先生的这本书完成了我的这个梦想，但我认为它确实是朝我梦想的方向迈进了一步。其理由如下。

其一，本书的作者自称是"语文不太好"的人，所以在阐述电子电气工程的基础知识时，采用了很多通俗的、形象化的比喻，而没有像许多大牌学者写书那样，以为读者什么都懂而采用大量晦涩难懂的专业术语。这使得本书成了一本简单易读的好书。本书作者在阐述电子电气工程的基础知识时，穿插了一些自己的亲身经历、故事及日常生活中的一些人人都感兴趣的话题，譬如《星球大战》、《星际旅行》、《呆伯特》等电影或小品中的人物、故事等，这就像老师给我们上了一堂不仅有知识、而且还有笑话的好课一样。

其二，本书介绍的电子电气工程知识没有局限在某一门课程，而是覆盖了电子电气工程的大量基础和专业课程，包括电路原理、模拟电路、数字电路、电机、电力电子、开关电源、自动控制、电磁兼容等，其内容从简单的R、L、C元件，到复杂的运放、微处理器/微控制器、数模/模数转换器、电机、电源，再到元件的

非理想性、电路的可靠性设计、仿真、焊接，以及电路和软件的故障处理等，这都是现代电子电气工程师需要经常与之打交道的知识。对于这些内容，作者不是像教材一样进行一一介绍，而是从自身的实践，用尽可能浅显的语言，来总结自己对这些内容的心得体会。

其三，本书不仅具有以上所述的丰富内容，还为读者提供了一些新颖的思维方法，例如书中介绍的单位代数、元件可视化、直觉分析法、积木工程法等，都是令读者感到豁然开朗，可以开扩视野、避免死记硬背的巧记、巧学、巧算、巧用的好方法。

其四，本书还介绍了作者作为技术开发部门的管理者，在项目管理、人员管理、人员招聘与解聘等方面的经验，对于指导人们如何进行科研开发、如何做好一名电子电气工程师及科研管理者、如何与同事及上下级协调相处等，提供了宝贵的建议。

最后，作者还将全书所述的内容，归纳成了简单易记的“经验法则”。通过阅读本书，Darren先生在电子电气工程领域中丰富的工作经验也就成了读者自己的经验了！Darren先生花了近20年才积累起来的知识和经验，读者只需读上一两遍就可以掌握，这不能不说是Darren先生送给大家的一份礼物。

本书的翻译工作，得到了许多同事和研究生的帮助，在此不一一具名。对于他们的协助，译者表示衷心感谢。

由于译者才疏学浅，译词失当、疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

尹华杰于广州华南理工大学

2008年5月

前　言

写在前面的话

我写作本书的意图在于，想把我认为在学校教育中容易被遗漏的或随着时间流逝容易淡忘的基础知识收集在一起。我热切希望，当一个新手向你请教的时候，本书能够出现在你推荐给他的翻破了的书中。有些基础的知识是电气工程行业的每一个学生、每一个工程师、每一个管理者以及每一个老师都应该掌握的！

我的口头禅是："并没有那么难！"很多年以前，我大学里的一个辅导老师曾经很自豪地告诉我，他们刷掉了一半以上刚开始修读电气工程专业课程的学生。我当时并没有说什么。不过我总在想，如果你让许多学生过不了关，那对于要教好这门课程的老师，不也是一种失败吗？我之所以总说"并没有那么难"，是想强调这样的事实：像我这样一个语文不太好的人，也能够理解电气工程的世界。这意味着你也一样能行！我所持的立场不同于多年前的这位老师，我坚信每个想搞懂这个专业的人必定能够搞懂它。我相信大多数读过本书的人都将有所收获。也许将来的某个时候应该出一个统计结果，展示给上面提及的这位辅导老师。这位辅导老师曾建议我放弃这个专业，但我挺过来了。也祝大家好运，请继续读下去以证明我的正确——"并没有那么难！"

一点说明：在本书每个部分的结尾，我归纳了一些要点，称之为"经验法则"。顾名思义，这些"经验法则"表述的概念对于那些真正优秀的工程师来讲都应该是熟知的，正是这些概念在一直引领着他们获得正确的结论和解答。如果某部分内容你不想仔细读了，至少确保掌握经验法则的内容。本书中，你将学到经过提炼的核心概念，这是你绝对应该掌握的。谢谢你给我传授一些理念的机会。我衷心希望你会觉得它们有用、有趣而又富于教益。

概述

致工程师

毫无疑问，我们周围有许多好老师，同时我相信你也打好了基础，但是时间

以及日常繁琐的工作让你遗忘了一部分基础知识。如果你也像我一样的话，那你一定找到了一些真正的好书，在需要的时候经常翻阅。这些书往往将你要用到的一些知识解释得很清楚、明白、易懂，我希望本书就是这类书中的一本。

你也有可能像“离开水的鱼”，本来是一个机械工程师，但却被放入了电气工程的世界里，需要对电气工程获得基本的了解，以便同周围的电气工程师们一起工作。如果你对本书中介绍的原理有良好的理解，那我保证你将至少能使那些“点子王（sparky）”（我喜欢这样称呼电气工程师们）对你处理问题的直觉感到惊奇。

致学生

我并非想要打倒学院式的教学体系，但我觉得，似乎有太多的学生是以“填鸭”的方式在学校里通过各门课程的。你当然知道我指的是什么！我所指的就是这样一种学习模式：听课、记住教师要你知道的所有知识、参加考试、在正确的地方填上正确的内容，最后完成了整个课程却没有带走半点实用的知识或技能。我认为许多学生是由于老师们没有花时间为自己负责的课程做好基本工作，而被迫进入了这种模式的。因为学生们承受着强大的压力，他们要避免悬在自己头顶上的红灯亮起来。实际上，如果在课程结束的时候，你能够对一门课程建立起基本的、直觉的理解，那么你应用这些基本知识所能取得的成功，要比应用相应的课程大纲结尾处的任何知识所能取得的成功都要大得多。

致管理者

工程经理们的工作要比Dilbert®（呆伯特）卡通片中头发直竖的那些老板的工作多得多。有一个事实许多经理不了解，即工程师们欢迎上司对他们所做的任何工作进行真正有见地的干预。请注意我说的是“真正有见地的”，你不能把你刚刚在食堂里学来的一些新概念传递给工程师们，并要求他们予以注意。然而，如果你理解了本书中的这些基础，那么我相信你总有机会正确地对工程师们进行指点。因此你将高兴地看到项目进展得更加顺利，工程师们增加对你这个老板的尊敬，他们甚至会把那些摆在桌上、用来发泄怨气的头发直竖的Dilbet卡通玩偶扫地出门！

致教师

请不要误解——我并没有说所有的老师都不好。事实上，除了一两个之外，我所遇到的老师都是很好的指导者。然而，有时我认为是教学体系存在着缺陷。

例如一门课程覆盖了X、Y和Z等内容，但由于来自系主任的压力，有时可能牺牲了更为基础的X和Y，而直接讲授Z。我曾有机会在自己的母校教了一个学期的课，所讲授课程的有些章节就被直接跳了过去。我希望给老师们多一个工具，以帮助你们把悬在学生们头顶上灯泡的开关翻到“及格”或“通过”的位置。

致　谢

没有任何一本书是一个人可以完成的。任何个人的知识都汇集了各种经验和教训。我衷心感谢以下这些人，是他们使得本书得以成印：

我的父亲，是他的常识和阅历告诉我："你可以做成别人认为不可能做成的事。"

我的母亲，感谢她传给我精明的基因，感谢她坚信自己的孩子是完美的。

我的妻子，感谢她的耐心和鼓励，感谢她承担了本来应该由我来做的许多事情，从而让我能够空出时间来完成本书。

我的孩子们，感谢他们理解为什么爸爸每次陪他们玩耍都不能善始善终、为什么每晚必须在办公室呆到很晚。

我的兄弟Robert，我是同他一起踏上写作历程的；以及Steve Petersen，我的一个密友及充满抱负的工程师，是他完成了本书最后的绘图工作。

感谢所有我想念的人，我向未能列出的其他应该感谢的人表示歉意，请联系我，我请客！

目录

第1章 必知必会的知识点

还记得曾修过的电气工程引论课程吗？多数情况下，我敢打赌你已经不记得自己是否曾上过一门编号为101的课程[①]了。当然你也许还记得曾修过这么一门课程，但就像我所修过的一样，没有什么价值！事实上，除了它被认为是一门"工程引论的课程"之外，我已经记不起关于它的任何东西了。

直到后来上到四年级以及毕业后，我才学到了一些十分有用的通用的工程方法。它们如此实用，以至于我真心希望在我大学课程开始的时候，学校就先教其中的至少三种方法。事实上，我坚信这是任何有抱负的工程师都应该掌握的最最基本的知识。我敢担保，只要你在每天遇到的挑战中都使用这些知识，你就会变得越来越成功；不仅如此，同你一起工作的每个人还将认为你是个天才！而你若还是学生的话，那么当你读到这些内容时，你会吃惊地发现，使用这些技巧能够解决大量的问题。它们是后续教学内容的基石！

1.1 单位的重要性

这个技巧是在我大学四年级时，一位我喜欢的老师反复灌输给我的。在学会这个方法之前，我一直靠强记大量公式来应付考试。在我应用这个技巧之后，我发现只需几个方程及少量的代数运算，就可以求解几乎所有题目。这确实是我为之欢呼的时刻，好像一瞬之间整个世界有了色彩！你还记得物理课上那些梦魇一般的解题经历吗？而如果利用下面介绍的单位代数的话，这些问题将变成小事一桩；你甚至不用费力，就可以得出它们的解答来。

1.1.1 单位代数

在这个技巧中，物理量的单位变得十分重要。不能因为计算器无法处理单位，就将单位丢在一边不管。事实上，应该先弄明白答案所需的单位是什么，然后再返回问题，从而构思出应该如何来求解问题。在我们用数字求解之前，应该先做

① 美国大学的课程一般以系为单位，都有一个编号。该编号的前面几位是英文字符，对应开出该课程的院系名称的缩写，后面三位是数字，由101开始，直到4XX，数字越大，表示难度越大，开课的时间越后。例如，EE101代表电气工程引论，ECE101代表电气与计算机工程引论等。——译者注

完以上的工作。这个方法的基本思想在代数课是学过的，但没有人教我们用它来处理单位。下面举一个很简单的例子：

已知一辆车在1min内能行驶1mile，请用每小时的英里数（mile/h，1mile＝1.61km）来表示该车的速度。

我们需要做的第一步是弄清楚答案的单位。在这里，我们的单位是mile/h或英里每小时。如下所示（切记“每”意味着“除以”）

$$\text{答案}=\text{某数}\times\frac{\text{mile}}{\text{h}}$$

下面将你所拥有的数据，按答案要求的单位，进行组合

$$1\text{mile}\times\frac{1}{1\text{min}}\times\frac{60\,\text{min}}{1\text{h}}=\text{答案}$$

记住：分子中的任何单位，可以与分母中同样的单位相互抵消，例如

$$1\text{mile}\times\frac{1}{1\cancel{\text{min}}}\times\frac{60\,\cancel{\text{min}}}{1\text{h}}=\text{答案}$$

当所有能够抵消的单位都去掉之后，剩下的是60mile/h，这就是正确的答案。你现在可能会说这很容易。不错，我就希望看到这种感觉容易的效果！如果你按照同样的基本套路行事，那你每天遇到的大多数“梦魇般的”题目都将在这种“诡计”下很快低头求饶。

这个技巧的另一个特别精彩的应用场合在于答案的验证。如果答案的单位不正确，那么极有可能在计算中存在某种错误。在使用MathCad®（工程师们离不开的一个工具）时，我总要在数值和方程中带上单位。当演算结束的时候，我要看到正确的单位，以证实方程建立的正确性（值得称道的是，MathCad会自动处理一些常用的单位转换）。所以，当你遇到一个题目，提供了一堆的数据，但你却不知道该如何下手的时候，请先思考一下答案所需要的单位是什么，然后再来整理这一堆数据，直到数据的单位与答案所需单位匹配为止。

记住：如果在题目中给各个单位赋予一定的意义，那么你得到的答案实际上也将代表一定的意义。

1.1.2　有时“几乎”就是“足够好”

我父亲曾经说过：“‘几乎’只有在投掷马蹄铁的套环游戏和投掷手雷的情况下才算数！”他通常会在我“几乎”把他的工具放回原处，或者在我“几乎”打扫完我的房间的时候说这句话。在我年幼的时候，我在某种意义上成了制造“几乎”场合的专家。如我父亲所言，在大多数情况下，“几乎”都不算数。然而，正

如上面的谚语所言，当使用手雷时，"几乎"击中目标就已经足够好了。我这里也列出几种情况，做到"几乎"就足够好了。其中的一种情况就是当你试图估算一个结果的时候。估算能力是与单位代数相伴的一种技能。

估算的技能或艺术有两个关键点。第一点是如何舍入到一个简单的数，第二点则是理解比值和百分比。

舍入容易理解。假定要做97与97相加的运算，因为这两个数都接近100，所以暂时把它们都看成100，相加在一起得到200，结果大约是这么多。这个例子对舍入的思想做出了相当简单的解释，这时你也许会想："为什么不直接在计算器上按两次97，然后按等号呢？"我的理由在于，随着题目变得越来越复杂，就越容易犯错，从而导致你在分析中远离正确的方向。还用前面的例子来说明，如果在你输入97加97之后，计算器显示的是487，你将其与自己头脑中的估算值200进行比较，立刻就会意识到一定是按错了键。

比值和百分比可以帮助我们了解一个量对另外一个量的影响程度。譬如你有两个系统，它们的输出是合在一起的。并且在你的设计中，其中一个系统的输出是另外一个系统输出的一百倍，两者的比值是100：1。现在若该产品的输出跑偏了，那么你认为在这两个系统中，哪个最可能出问题呢？显然，当你估算两者的比值时，就会发现其中一个系统的影响较大。

培养估算技能有助于我们在工程分析与故障排除中避免走入死胡同，白忙活一场，并且可以让我们避免在讨厌的期终考试中吃哑巴亏。在脑袋里尽可能多地练习估算技能吧！使用计算器和其他工具没什么不好，但请同时在脑袋里进行估算，以验证你的工作。

在我们进行估算时，就是通过引入一定的误差，来简化求解过程。我们获得的估算答案将是"几乎"正确的，足以帮助我们辨别出可能会在其他地方犯下的错误。

在掷马蹄铁的游戏中，如果你"几乎"套中了一个木桩，就会获得几分加分，但我不信你的老板会因为你的电路"几乎"可以工作了而高兴。不过，如果你的估算"几乎"正确的话，那么它将帮助你设计出像我父亲那样挑剔的人都会说好的电路。

经验法则

- 始终在方程中考虑单位，这可以确保我们得到正确的答案。
- 利用单位来建立被求解问题的正确方程。其步骤是先建立单位方程，然后抵消单位，直至获得所需的结果为止。

- 当我们分析问题、进行故障排除时，要估算答案的近似值，然后同计算结果进行比较，以辨别错误。

1.2　使电气元件可视化

机械工程师的工作有一个有利的地方，就是他们在大多数情况下都可以看得见自己工作的对象。电气工程师通常就没有这个福分了。我们必须想象那些讨厌的电子是如何在电路中穿来穿去的。下面来做一些基本的对比，利用我们所熟悉的一些实物，来对电路建立一种直观的理解。这样做还有一个好处，就是我们可以继续停留在机械问题的讨论之中。之所以要进行这种对比，主要有以下几项理由。

- 和理解电气的世界相比，一般人能够更直观地理解实物的世界。这是因为我们天天利用我们所有的感官来与实物的世界相互作用，而电气的世界却是充满魔幻的，甚至对教育程度很高的工程师来讲也是如此。这是因为电路内发生的许多事情是看不见、摸不着、听不到的。想一想，当按动一个电灯开关，电灯就亮了，我们并不用考虑电流是如何引起电灯变亮的。而当我们沿着地板拖动一个沉重的盒子时，我们肯定会想到摩擦的原理。
- 这两个学科的法则其实是完全一样的。一旦我们理解了其中的一个，我们也就将理解另外一个。这一点很好，因为我们只需要学习原理一次即可。我习惯称电气工程师为“点子王（sparky）”，而称机械工程师为“扳手（wrench）”。如果你能够对本课程有一个直观深入的理解（grok①），那么“点子王”就能够在“扳手”林立的环境中挺直腰杆，反之亦然。
- 当我们对电路中发生的事情有了一些感觉以后，我们就会成为一个令人吃惊的、精确的故障排除者。人脑是一个不可思议的仿真仪器，但与计算机不同，人脑能够基于不完全的信息，凭直觉跳向正确的结论。我相信通过这些相似性的学习，可以增进我们大脑的能力，这样我们能够将一个系统中的运行、输出等线索整合在一起，进行正确的分析。这将帮助我们的大脑去“仿真”一个电路。

电气元件的机械等效

在介绍机械等效之前，先来了解一下什么是电压、电流和功率。电压是电子流动的势差。电流是电子流动的流量。有时最好的比方就是那些很俗的、到处都

① 如果你不理解“grok”的意思，我推荐你阅读Robert Heinlein的*Stranger in a Strange Land*（《异乡异客》）。我个人将其列为最好的10本书之一。

在使用的比方，理解这些电气量也是如此。让我们考虑喷枪中的水。电压就是喷枪中水压的大小，压力的大小决定着水喷射的远近。不过，若有一个小捣蛋，他拿着一杆30ft（1ft＝30.5cm）长的水枪，喷射出极细的一股水柱，那么这决不会淹着你。电流就有点儿像那喷出的水柱。不过，在打水仗的时候，一股很大、但却射不了多远的水柱是没有什么威力的。我们需要的是一杆巨无霸的喷枪，它喷出的水柱直径有0.5in（1in＝2.5cm）、远近有30ft，它是水仗中威力无比的武器。在电气术语里，电压、电流和功率间彼此的关系跟这里的情况是一样的。它们之间的关系其实很简单，公式如下：

$$\text{电压} \times \text{电流} = \text{功率} \tag{1-1}$$

可见，为了得到功率，我们既需要电压，又需要电流。如果两个中的任何一个等于零，那么得到的功率也就等于零。下面我们来讨论电路中的三个基本元件①，看看它们是如何同电压、电流相联系的。

1. 电阻等效于阻尼

考虑一下，在粗糙的地板上拖动一个沉重的箱子时（如图1-1所示），会发生什么呢？系统的阻尼将阻碍箱子的运动。阻尼系数跟箱子的速度有关。移动箱子的速度越快，阻尼系数就越小。可以用下面的方程来表述②

$$\text{阻尼系数} = \frac{\text{阻尼力}}{\text{速度}} \tag{1-2}$$

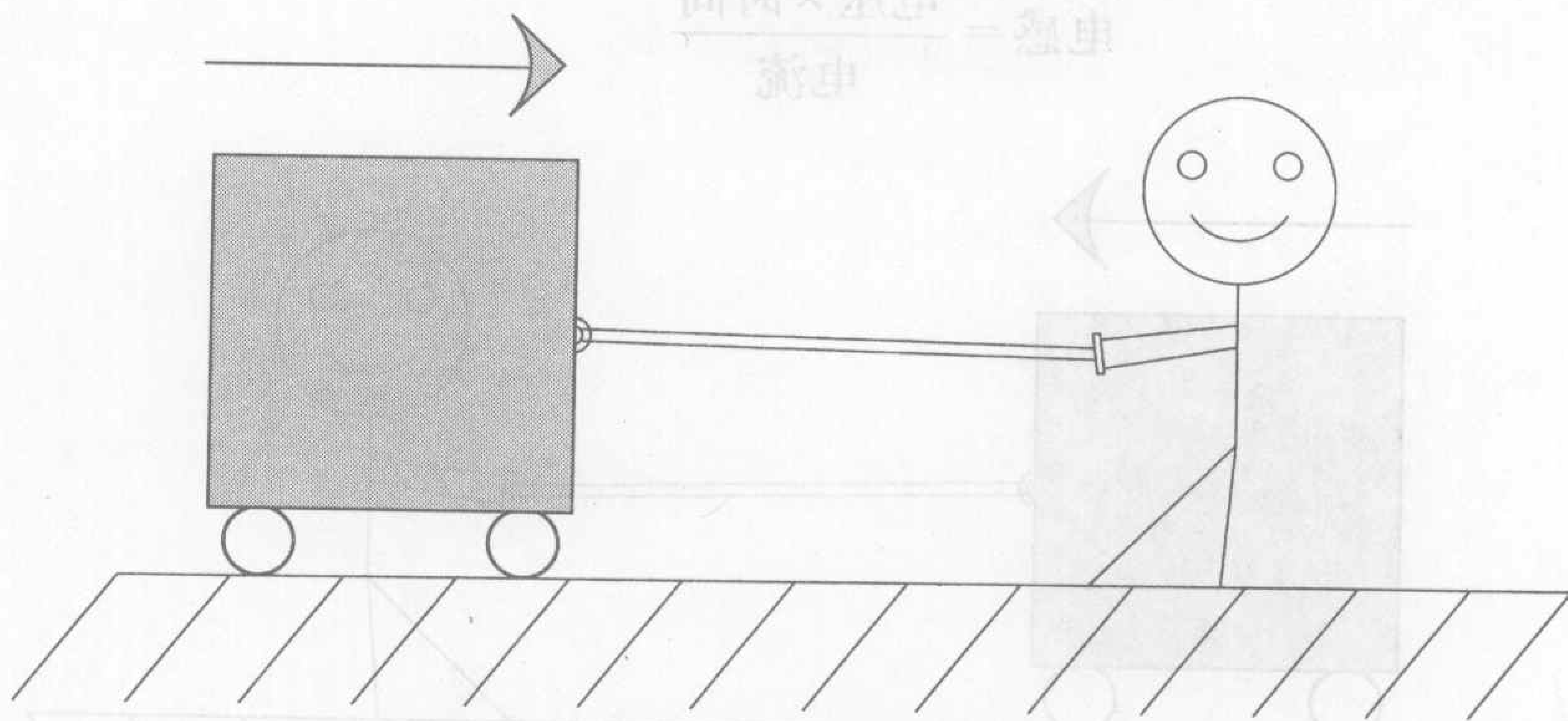


图1-1 阻尼阻碍箱子的移动

① 本书中，作者只提到了电路中的三种无源基本元件：电阻、电感、电容。然而，在2008年5月的《自然》期刊中，科学家已经证实第四种无源基本元件——忆阻（memristor）的存在，并成功设计出能工作的忆阻实物模型。——编者注

② 此处，为了便于读者理解电压、电流与电阻的关系，作者打了一个并不精确的比方，来将电阻在电路中的作用比作阻尼系数在机械系统中的作用。——编者注

此外，阻尼把损耗的能量以热的形式散发到了系统之中。换句话讲就是：阻尼使东西发热。在电路中，电阻的作用跟阻尼是等效的。电阻将阻碍电流的流动，就如同阻尼阻碍箱子的运动速度一样。在电阻阻碍电流的时候，温度也将升高！我们可以用下面的方程来描述这个关系，并称之为欧姆定律

$$\text{电阻}=\frac{\text{电压}}{\text{电流}} \tag{1-3}$$

你能看出它同阻尼方程的相似性吗？它们的形式完全相同！仅有的差别在于求解所用的单位不同。

2. 电感等效于质量

仍以箱子为例。先让我们假定没有阻尼，以免妨碍我们的理解。设想将箱子放入一个无阻尼系统中，给其装上无摩擦的轮子，放在光滑的轨道上（如图1-2所示）。你应该知道，让箱子动起来是需要做一定的功的，但一旦动起来，不用费力它也会很好地运动下去。事实上，要使它重新停止下来也需要消耗一定的功。需要多少的功取决于箱子有多重。这就是大家所熟知的惯性定律。尽管在电被发现之前很久，牛顿就已经发现了惯性定律，这个定律也还是能够很好地套用到电感上。质量阻碍速度的变化，与此类似，电感则阻碍电流的变化。

$$\text{质量}=\frac{\text{力}\times\text{时间}}{\text{速度}} \tag{1-4}$$

$$\text{电感}=\frac{\text{电压}\times\text{时间}}{\text{电流}} \tag{1-5}$$

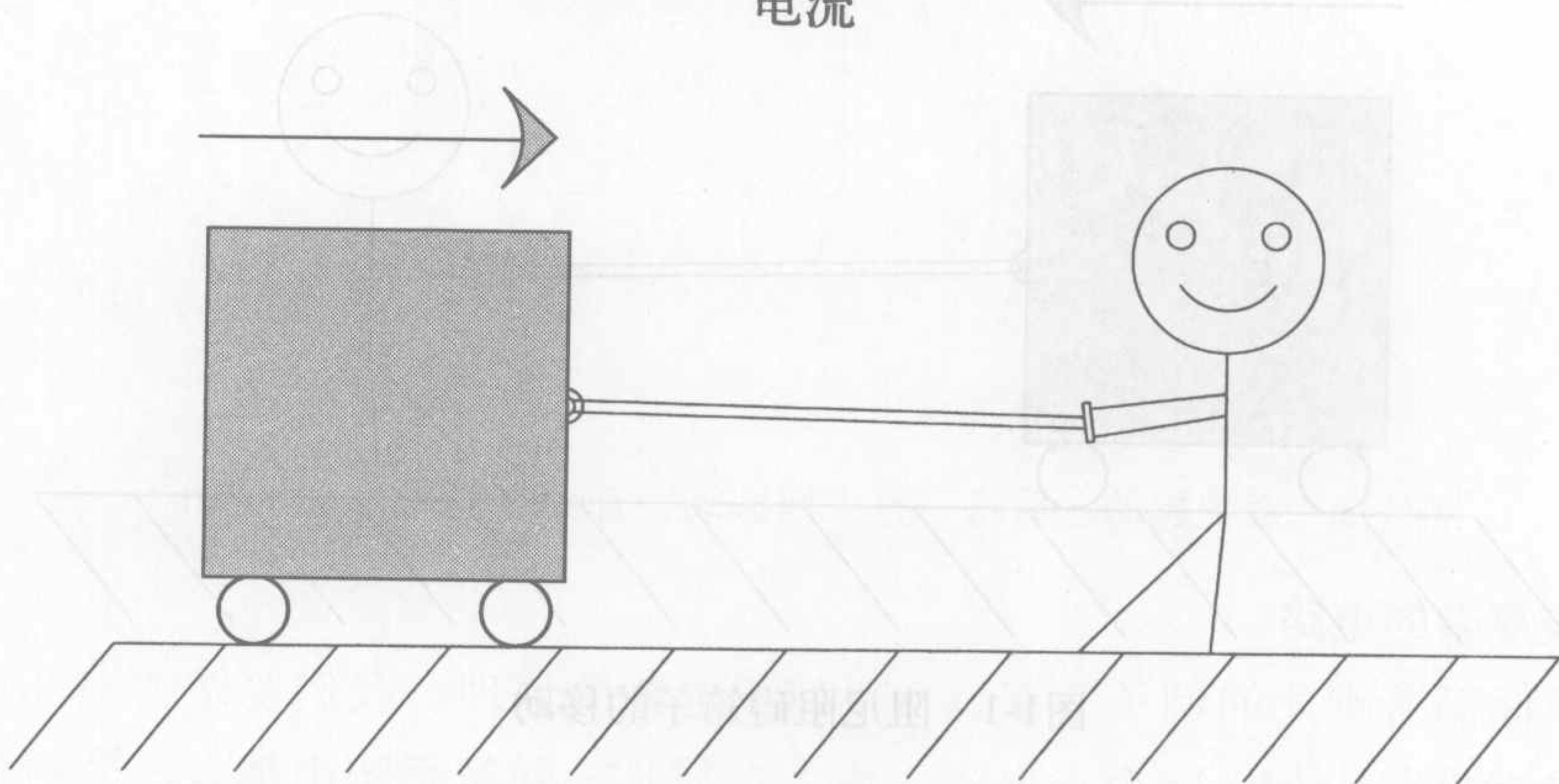


图1-2 虽然系统中没有阻尼，但要使箱子动起来或停下来，都需要付出努力

3. 电容等效于弹簧

弹簧的功能到底是什么呢？请在脑海中想象你正握着一个弹簧，请拉长它并保持住，然后释放。发生了什么呢？它快速弹了回去！弹簧具有储存能量的能力。当在它

上面施加外力时，它将保持这个外力带来的能量，直到释放为止。电容跟弹簧的这种弹性是类似的。（注意：我们从物理课中学得的弹簧系数等于弹性模量的倒数。）

$$\text{弹性模量} = \frac{\text{速度} \times \text{作用时间}}{\text{力}} \tag{1-6}$$

$$\text{电容} = \frac{\text{电流} \times \text{作用时间}}{\text{电压}} \tag{1-7}$$

我一向认为，用单词“capacitor”（电容）来表示有能力（capacity）储存能量的元件十分贴切①。

4. 储能电路

让我们来考虑基本的储能电路（或称LC电路）。它能做什么呢？振荡！如果是理想的电路的话，它将以谐振频率永远振荡下去。在机械系统中，如何才能出现这种现象呢？请记住这些等效关系：电感等效于质量，电容等效于弹簧。让我们在脑海里面做个“试验”，在前一个图（图1-2）的箱子上系一个弹簧（如图1-3所示），然后拉动它一下，会发生什么呢？振荡起来了。

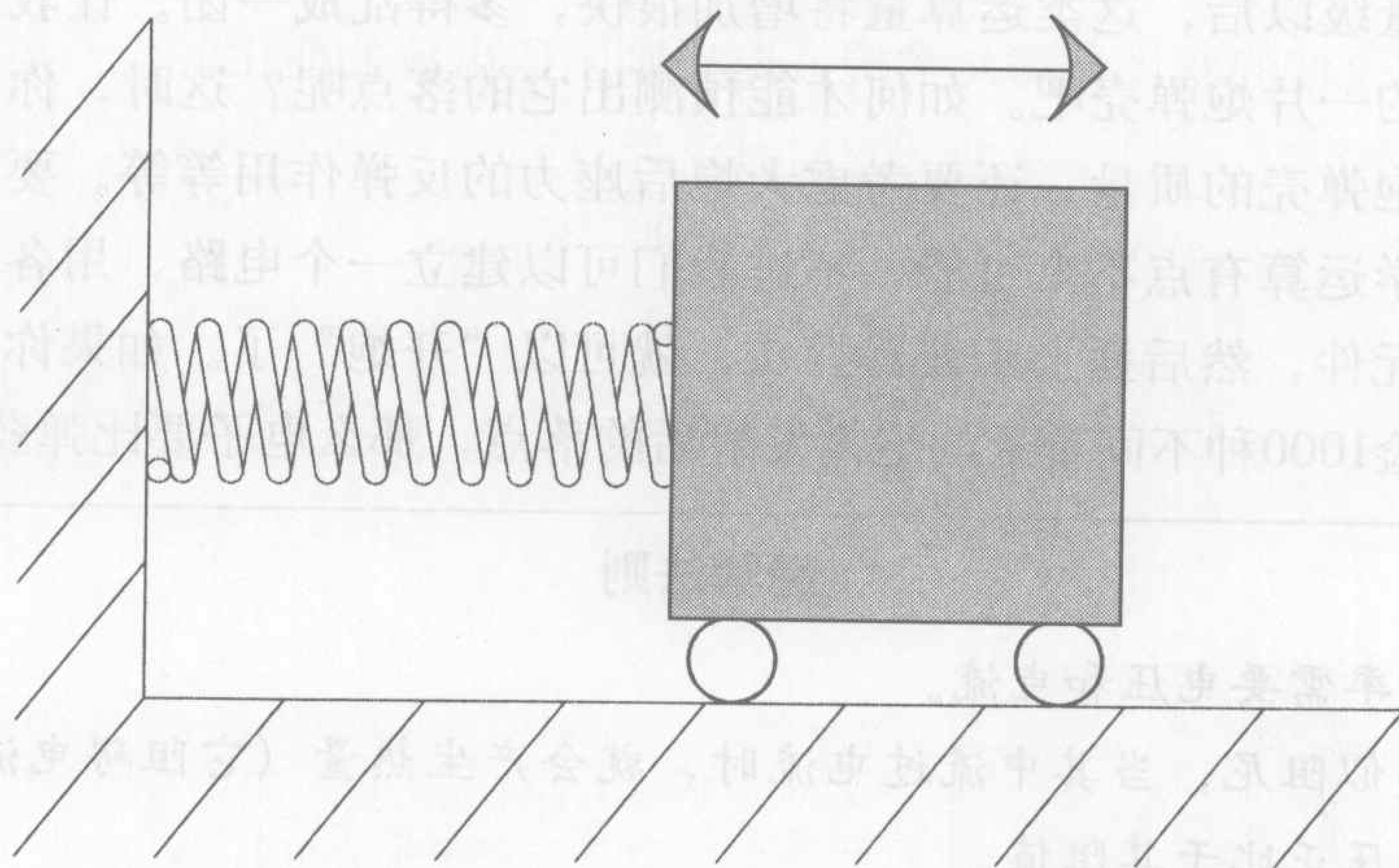


图1-3　系统起动之后将一直来回振动，直到阻尼使其停顿为止

5. 较复杂的电路

让我们循着刚才的例子，探讨一下LCR电路的原理。我们要做的全部工作就是，在储能电路中加入一个小电阻，或者在质量－弹簧系统中加入一个阻尼。让我们把箱子上的轮子绑紧一点，使其能够阻碍箱子的运动。这时你再拉动箱子，

① 从技术角度讲，电感也能储存能量。在电容中，能量储存在电容内部及周围空间的电场中；而在电感中，能量则储存在电感产生的磁场中。储存在电感中的能量可以在大电流下高效地提取出来，这就是在大多数开关电源的一侧有一个无源元件——电感的原因。

会发生什么呢？它在来回振动几下之后，就会停下来！系统中的阻尼会使箱子的运行速度越来越慢。之所以称之为阻尼，是因为它对振荡起到了阻碍和抑制的作用。在LC电路中，电阻的引入会起什么作用呢？它同样会对电路的振荡起到阻尼的作用！

经过这样的对比，我们就把电的世界简化成了日常生活中的东西。由于这两个系统中的元件是如此相似，因此你所学过的所有数学技巧，只要它适用于其中一个系统，也就适用于另一个系统。还记得傅里叶变换理论吗？它是在很早以前针对机械系统提出的，后来人们才意识到它也适用于电路。请记住：所有你已经学过的或者你正在学的高等数学，像拉氏变换、积分、微分等等，它们在这两个系统中都一样地起作用。与求解电路相同，你也可以用拉氏变换来求解一个机械系统。

在20世纪五六十年代，美国政府花费了大量的金钱，以便用电路来模拟上面那样的机械系统。这是为了什么呢？这是因为，在模拟真实世界的系统时，我们会遇到各种各样的积分、微分以及其他令人讨厌的数学运算。当复杂度的阶数增大一两个数量级以后，这类运算量将增加很快，多得乱成一团。让我们考虑从坦克中射出来的一片炮弹壳吧。如何才能预测出它的落点呢？这时，你既要考虑空气的摩擦、炮弹壳的质量，还要考虑大炮后座力的反弹作用等等。要想手工计算所有这些数学运算有点不太可能，不过我们可以建立一个电路，用各种电气元件来代表机械元件，然后插上示波器探头，就可以“开炮”了。如果你想在不同的海拔下，试验1000种不同重量的炮弹发射后的落点，那么电子要比弹药便宜得多。

经验法则

- 产生功率需要电压和电流。
- 电阻类似阻尼，当其中流过电流时，就会产生热量（它阻碍电流）。电阻两端的电压正比于其阻值。
- 电感类似质量。
- 电容类似弹簧。
- 电感是电容的“倒数”。

1.3　直觉的方法——直觉信号分析

我不知道学校里是否教这个方法。“直觉信号分析”这名字是我自己取的，它是我在大学和工作单位里自学学到的。直到我工作了一段时间并且向年轻的工程师

们讲解了这个方法来帮助他们解决难题以后，我才开始真正将其看成一个法宝。不过我坚信，有许多的聪明人，实际上一直都在用着这个技巧，但却不知道这个名字或者没有给它取名。对这些人来讲，他们似乎有一种能力，对于别人已经耗费了数小时但却还不得要领的工作，他们用手一指，就能点出问题的症结所在。他们似乎凭直觉就知道会发生什么。我认为这是一种能够教授并且应该教授的技能。

应用直觉信号分析方法需要遵循三条基本的原则（我这里把直觉信号分析简称ISA。因为如果要指望这个方法能够在工程界流行的话，它就应该有个缩写名称）。

第一，必须强化基础知识。譬如，当频率升高时，电容的阻抗会怎样变化？它会降低！对于这类知识，你不仅要做到熟知，并且应该熟练到会自动从脑袋里蹦出来的程度。你若熟悉了这条知识，就能够马上辨别出一个滤波器到底是高通滤波器还是低通滤波器。再如，在频率升高时电感的阻抗会怎样变化？运放的负反馈起什么作用？它的输出是如何变化的？等等。你不必用心记住它们的每一个方程，但确实应该知道它们变化的方向或规律。至于对幅度变化应该掌握到什么程度，我认为只要对信号的强度有一个总体的认识，通常就足以使我们在电路不能正常工作的时候，可以定位到出问题的部分。

第二，你要练习，练习，再练习。你需要对各种元件的工作原理有感觉；需要在实验室中度过大量的时间；需要理解每一个元件的基础内容；需要知道一个特定的信号加到一个特定的元件上时会对它起什么作用。你还记得基本元件的机械等效吗？它们是让你能够“看到”电路运行场景的基石。在输入变化的时候，你必须能够想象出在电路中发生的事情。如果你能够使发生的这些事情“可视化”，那么就能够预测出输出将会是什么样子。

第三，拆解问题。有这么一个故事，一个求知者请教一个智者说：“怎样才能吃下一头大象呢？”智者回答说：“一次咬一口。”电路问题的处理也应该这样。先选择一个点，然后从它开始贯穿全部。也就是说，要拿起电路，把它分解成容易处理的小块。一步一步，画出表示电路中信号变化方向的箭头。你应该在口里自言自语，说着一些相关的问题及其答案[①]。就像这样：“这里的电流是上升的吗？”“电压在这样的点上应该是下降的。”需要注意的是，有一个细节你没有必要知道，那就是输出的精确值到底是多少。为了能够凭直觉了解电路，你不一定非得记住书上的每个方程，但你必须知道当改变一个元件的数值时会产生什么样的影响。例如，对于一个交流信号输入的低通RC滤波器，如果增大其中电容C的

① 通过跟两三个人进行了深入交流之后，我认为所有的聪明人都有自言自语的倾向。他们能否被社会接受，则取决于他们的自言自语能否被周围的人听到。

数值，输出的幅值会怎么样变化？它将变大还是变小？凭借跟上面类似的一些基础知识，你应该马上就知道答案是“减小”。你也应该知道减小的程度取决于信号的频率和滤波器的时间常数。当增大晶体管的基极输入电流时，会发生什么呢？通过集电极的电流会增大！当电流减小的时候，电阻两端的电压会怎样变化呢？诸如此类的问题牵涉到的其实都只是元件之间的简单作用，但却仍有大量的工程师无法脱口说出它们的答案，你一定感到十分惊讶吧！

在实验室里呆上大量的时间非常有助于这种技能的培养。如果你已经对各种各样的电路的响应见识过了很多很多次，那么就会知道它们会怎么样工作。随着这种知识的不断积累，一件奇妙的事情就会发生。你的脑袋变成了一个电路仿真器！你将能够把电路中各种元件的影响综合起来，凭直觉就明白将会发生什么。下面举一个例子（如图1-4所示）。

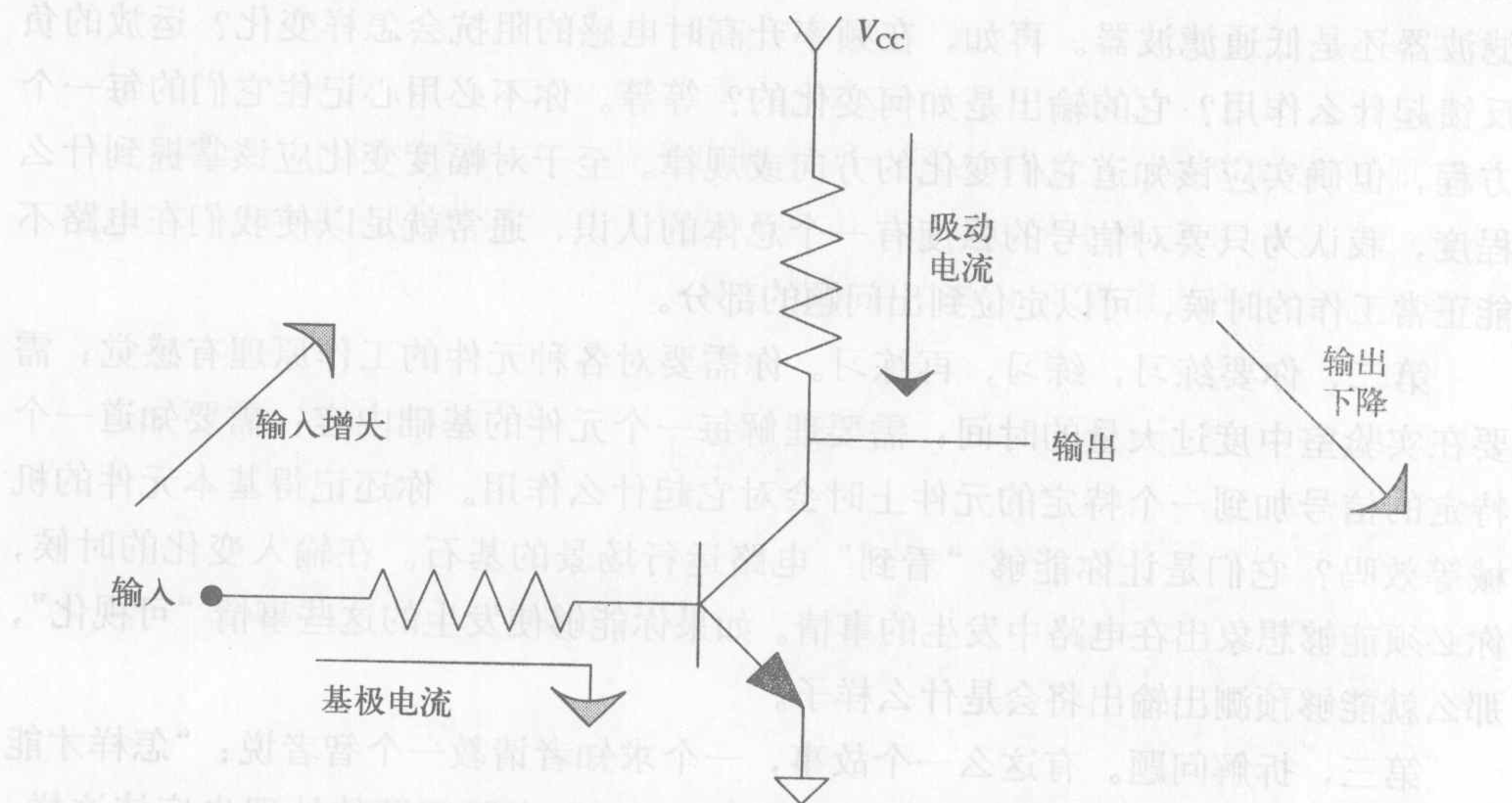


图1-4 利用箭头将电压、电流的变化可视化

目前你可能对于什么是晶体管还没有一点头绪，因此可能会考虑跳过这个例子。不过当你学完了晶体管的那部分内容时，请务必要回到这里，以便你头上的“啊哈！”灯泡能够点亮。我的本意是要介绍一种分析思路，因为我们一开始就需要这种思路的帮助，但我现在要介绍的却是一个实例，这有点“是该先有鸡还是该先有蛋”的味道。图1-4的这个例子需要我们了解这样一些知识，即晶体管是一种让电流流向输出端的器件，并且该输出电流正比于流过基极的电流。

当输入电压增大时，基极电流增加。这导致上拉电阻中的电流增加，压降也增大。这就是说，当输入电压增大时，输出电压必然下降。通过这个完整的例子，

我们可以真正了解一个电路是如何工作的。

通过计算机仿真器也可以培养出这种凭直觉来理解电路的技能。在计算机上很容易改变参数、并观察其对输出的影响，不仅如此，你还可以在很短的时间里尝试许多种不同的配置。然而，你必须小心使用这类仿真工具。因为它们很容易使人陷入这样一种境地，即过分地相信仿真器，以至于实际电路不能得出仿真结果时，你会认为现实世界出了问题。现实世界不会出故障，而是仿真器遗漏了某些东西！我认为当工程师用仿真器建模时，最好先从最简单的电路开始。除非你已经领会了基本部件的运行情况，否则请不要跳去建立复杂的模型——例如，你应该先熟悉RC电路的阶跃输入的建模。针对类似的简单RC电路，改变其R和C的数值，观察所发生的事情，这就是一个工程师可以对R和C这两种元件建立起正确的直觉理解能力的一种方法。还要给大家一点警告：请不要把所有的时间都花在仿真器上，还应保证充足的实验时间。

你将发现这种直觉信号分析能力在诊断问题及设计工作中极其有用。随着你直觉理解能力的增强，你将达到一种特别的境界，无需等到拥有了所有必需的材料即可直接跳到正确的结论。如果仿真的结果看起来跟你的直觉不一样，你会马上发现哪个电路的建模不正确。直觉是计算机所不具有的技能，所以你一定要充分利用它的优势。

经验法则

- 强化基础：用心学好基本的公式。
- 在基础电路上积累大量的经验：多花时间做实验，要达到凭直觉就能知道元件将如何影响信号的目标。
- 拆解问题：在原理图上画上箭头和说明，指明信号的作用。
- 确定信号变化的方向；是正相关还是负相关？
- 培养估算的能力。
- 利用示波器和简单元件，多做些实验。

1.4 “积木”工程

构件

好了，现在来介绍我的第4件法宝①。这是我的一位指导教师（我将称他为

① 有些读者可能想知道我能否数得过来，所以我特意编上号。

Chuck[①]）教给我的一个秘诀，我现在就把它传给大家：几乎所有的学科都要比我们所想象的更容易理解。可以这么说，那些故作神秘的教授们所传授的一大堆内容，往往只有5~6个基本的原理或公式在支撑着，只是这些教授们不希望你知道而已。一旦你领会了这一点点的基础，你就可以推导该领域所有其余的原理和公式了。这就像古老而简单的Lego®牌拼装玩具一样：给你5~6种形状，你就可以拼装出任何其他的形状了。如果你"真正"弄懂了一门学科中那几个基本的原理，那你就将成为该学科中的佼佼者。Chuck还经常说的一件事就是，所有伟大的发现都只比这些基本的原理高出一两个层次。这就意味着，如果你真正熟悉了这些基础，你就会对其余的知识掌握得很好。大家都知道人有健忘的特点，较高层次的知识往往会被人们束之高阁，很快就会遗忘，但即使是像我这样一个由工程师转过来的经理，也几乎天天都会用到那些基础的知识。

由于本书是关于电气工程的，因此我按照自己的方式列出电路中几个最基本的方程：

- 欧姆定律
- 分压原理
- 电容阻碍电压的变化
- 电感阻碍电流的变化
- 电阻的串、并联
- 戴维南定理

后面的章节将对它们做更详细的介绍，不过在这里先提几个例子。你也许会说："你连电容的串并联都未列上，难道这不也是一条基本的原理吗？"不错，它也十分基础，但它并不是最基础的知识，电阻的串并联比它更为基础。当往电路中加入电容时，实际情况是，必须考虑信号频率的影响，而其他公式却还是原来的。理解电容和电感是如何工作的，并将它们应用到基本的原理中去，要比试图去记住过多的方程更有益处。你也许还会问："那诺顿定理又怎么样呢？"从根本上讲，它不过是戴维南定理翻过来的另一面而已，既然其中一个已可以满足需要，为什么要学两个呢？由于我偏爱用电压来思考问题，因此我把戴维南定理放在脑袋里。你也许偏爱用电流来求解，因而你应该使用诺顿定理，但最后将得到相同的答案。所以请挑选其中的一个，并依靠它就行！

人们总会景仰更高级的知识，但在大多数时候，往往是对基本原理的灵活应

① 在他的第一堂课里，他在黑板上写下了"Dr. Charles Tinney"，然后转过身来说："你们可以称我Chuck！"我不得不赞赏Charles博士——他是我遇到过的最好的老师。从他的角度来看，没有什么东西是不能理解的，没有什么东西是不能教你弄懂的。

用，才能使你手上遇到的问题屈服于你的工程能力。上面列出的六条基本原理，就是你应该牢记并理解的，而且你还应该能够在脑袋里对它们进行“估算”。正是凭借这些基本原理，你努力培养的直觉才能成为强大的工具，你脑袋中拥有的仿真能力才能释放出来。

如果你真能把这些忠告牢记于心，那么在很多年以后，当你也带上“竖发”①并且忘记了所有你曾经学过的高级东西的知识，你将仍然能够在手下的工程师们诧异的眼光下求解工程问题。

这个秘诀可以推广到所有其他的学科。检视你正在学的知识，从中找出少数几个能够推导出其余知识的基本点，那么你就发现了该学科的基本“积木块”了。它们就是你在该领域中赖以成功而必须反反复复学习的知识！另外我特别要告诉你们的是，玩这种“积木”游戏其实有很多乐趣！

经验法则

- 在任何学科中都有几条基本原理，由此你可以推导出其余所有的原理。
- 用心学习这些基本原理，并培养对它们的直觉理解能力。
- 大多数重大发现都只比这些基础高一两个层次。

---

① 若你在过去几年里一直住在一块岩石下面，就会错过那个相当成功的工程卡通片，因此我要给你解释一下，这意味着你被提升成了管理者。

第2章 基本理论

每个学科都有一些基础的知识，它们可以用来推导出其余更为复杂的理论。基本原理是我们所能学到的最重要的知识。正是基本原理方面的知识，在帮助着我们正确地运用头脑中的所有知识。一个人能否在睡梦中求解二次方程或微积分无关紧要，但是如果你不能将基本的原理融会贯通，那么你将发现自己在解决问题时往往会徒劳地兜圈子而找不到答案。若从本书中捡出任何一个部分，请确保你真正理解其基础。

2.1 基本原理

2.1.1 欧姆定律

我认为欧姆定律是学校里教得最好、也应该教得最好的原理之一。那为什么还要来重复它呢？我有两点理由：第一，复习基础永远不嫌多；第二，尽管任何工程师都能打心底里说出欧姆定律的定义，但在实际应用中它却常常被人们忽视。

先让我们写出欧姆定律：电压等于电流乘以电阻（参见图2-1），即

$$V = I \times R$$

它很简单，不过我要问你，你是否考虑到了电阻存在于电路中的每个部分（除非它是超导体）这一事实？这一点很容易忘记，特别是很多的仿真器会忘记这一点！为了把这一点学到家，我认为最好的方法就是来回顾一下我是如何把它学到家的。

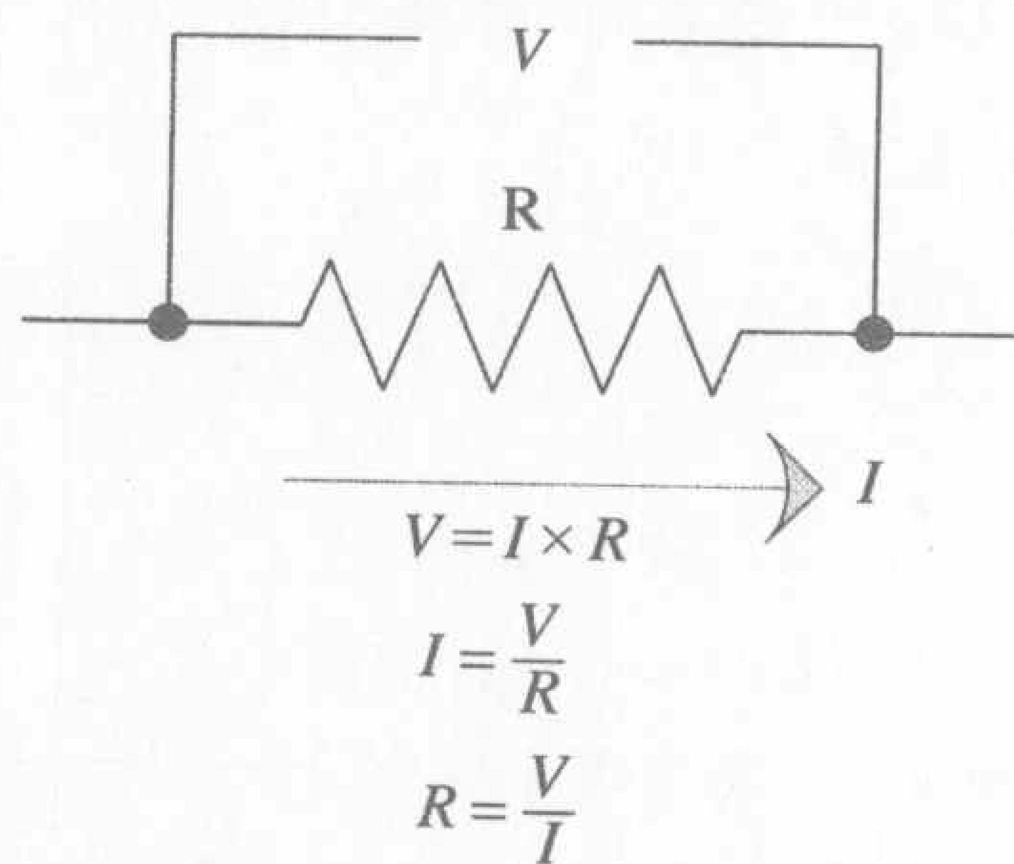


图2-1 欧姆定律是跟电有关的所有理论的核心

当我还是一个低年级学工程的学生时，我兼了一份技术员或者说助理工程师的工作（到底该怎么称呼取决于你问的是什么人）。我跟拥有电机工程硕士学位（MSEE）的老板进行了一场辩论，不仅他不相信我的观点，连我的主任工程师（一个电机工程学士）也不相信我。然而，即便他们有“超级”知识的光环照耀着，也无法让我去怀疑欧姆定律（其实我是不应该同这些“狂犬”们进行激烈辩论的）。

具体情况是这样的：我们部门需要测量一个直流电机在任何给定时间内的电流，该电流的范围是5~15A，但问题是我们所用的万用表的电流测量回路中有一个10A的保险丝。因此我根据欧姆定律设计了一个分流器来测量电流（作为一个学生，当时欧姆定律在我的脑袋里还是比较生疏的）。我希望数据容易读取，并且尽可能不要干扰电流，因此选用了一个0.1Ω的分流电阻。我做了一个盒子来放置这个分流器，并装了一个香蕉形插座来给电压表提供方便的接口。设计大致如图2-2所示。

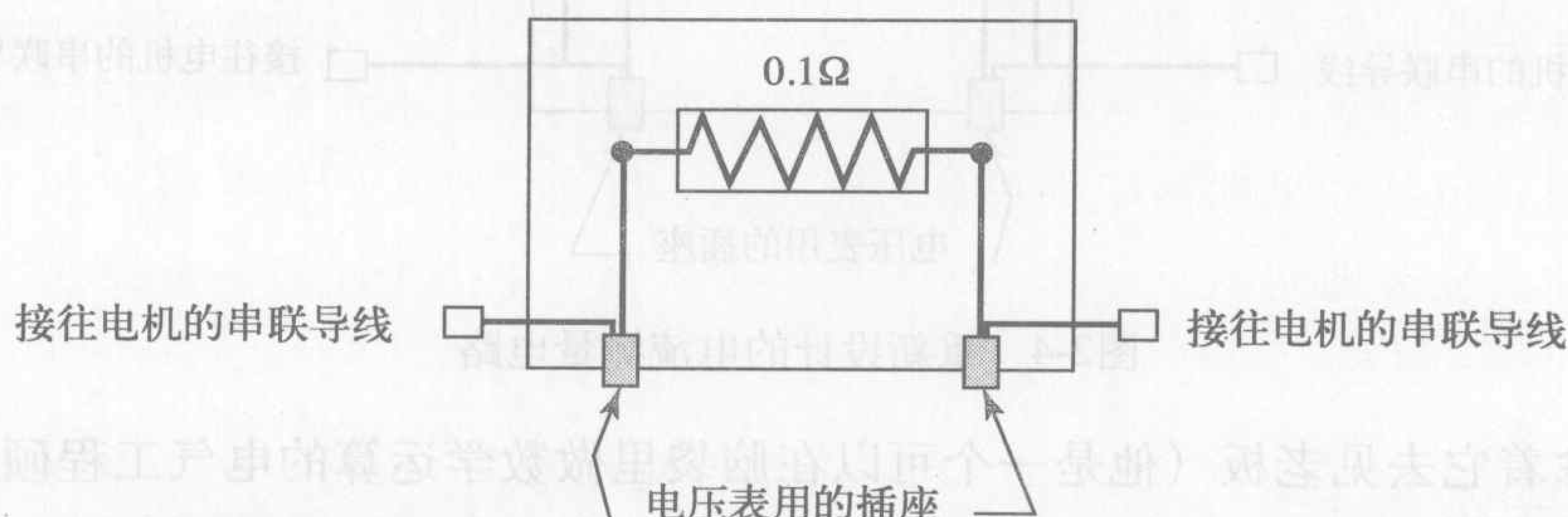


图2-2 简单电流测量电路的原始设计

每个人都认为这是一个了不起的好主意，所以我做了好几个盒子，并且马上开始使用。然而不久以后，我们就注意到它们并不精确。有时偏差竟高达50%~60%。没有人能道出其中的原因，因此我就坐下来分析我做的这些电路。

一段时间后，我恍然大悟，意识到了问题的根源。为了方便装配，我把电机的引线焊接在了香蕉形插座上，然后再焊接了几段14号线规的跳接线到分流器上。电路如图2-3所示。

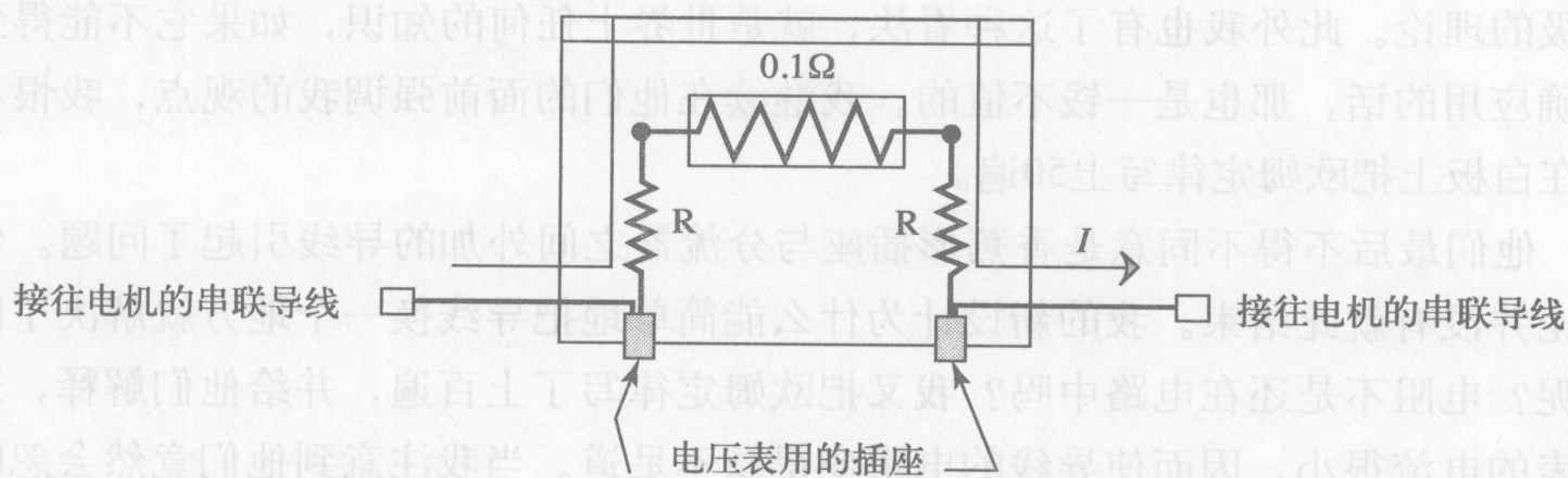


图2-3 实际做出的简单电流测量装置的电路

我的电压表其实是跨接在一个大于0.1Ω的电阻上进行测量的。导线也有电阻，对于14号线规来讲，即便是两段数英寸长的导线，其电阻也有百分之几欧姆。请注意欧姆定律是这样的：

$$V = I \times R$$

我意识到，这意味着你若增大电阻R，你就将从同样的电流中得到更多的V，因而出现我们所看到的错误。我所犯的是一个低级错误，所幸很容易改正。我在纸上对盒子进行了重新设计，如图2-4所示。

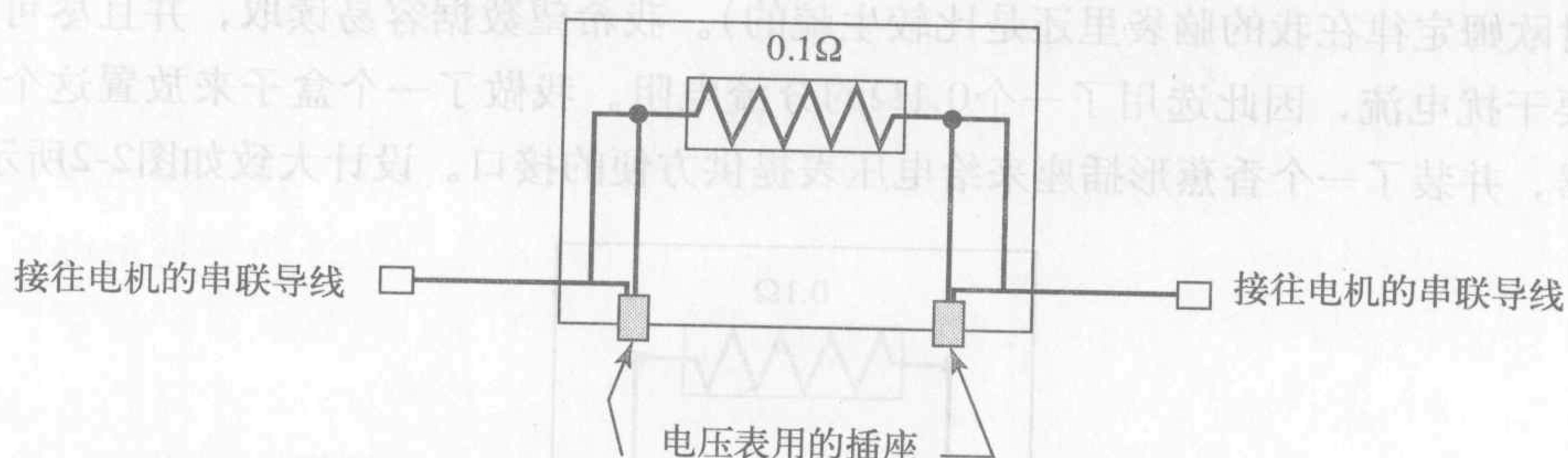


图2-4　重新设计的电流测量电路

我拿着它去见老板（他是一个可以在脑袋里做数学运算的电气工程硕士，而我却只愿一边喝冷饮，一边在MathCad中做运算），他的反应使我震惊不已。他同主任工程师一起讨论了我的电路，并得出结论说我完全搞错了。他们谈论了温度系数、电流相位移、有效值以及其他一大堆在当时令我十分头大的概念。一场辩论就此开始了。我解释说，原理图上的两点必须用导线来连接，而导线是有电阻的。虽然它常被忽略，但在此处，由于分流器的阻值是如此之小，因此导线电阻具有重大的影响。

当他们对我的解释支吾其词的时候，我就意识到，在许多时候，人们的天性就是容易忽略很早以前学过的知识，而偏爱那些自己不过是知道而已、但却更加高级的理论。此外我也有了这种看法，就是世界上任何的知识，如果它不能得到正确应用的话，那也是一钱不值的。我继续在他们的面前强调我的观点，我恨不得在白板上把欧姆定律写上50遍。

他们最后不得不同意是香蕉形插座与分流器之间外加的导线引起了问题。但争论并没有就此结束。我的新设计为什么能简单地把导线换一个地方就解决了问题呢？电阻不是还在电路中吗？我又把欧姆定律写了上百遍，并给他们解释，通过表的电流很小，因而使导线的电阻变得微不足道。当我注意到他们竟然会忽略显而易见的知识时，我的惊异达到了一个新的高度。前面的辩论根本不能同后面的这次相比，这次真可以说是争论得火光四射。

从我的这个故事可以得到什么教益呢？当Dilbert公司的创始人Scott Adams看到维修人员仅仅换了一颗新电池，就把他“坏掉”了的传呼机修好的时候，他深有感触地说：“每个人都有愚蠢的时候。”我不得不同意他的观点，因为大约每6个

月，我就会重新“发现”欧姆定律一次。我强烈地要求你们，无论任何时候，在你试图去寻找更复杂的解答之前，都要先去检查最基本的可能性！我的父亲是一个机械工程师，他有一次几乎把整个汽车的线路都重新接了一遍，最后才发现是保险丝断了（保险管外观是好的，他之前没有用表去量）。这是他的教训，我的教训则来自上面提及的这场长达4h的难以置信的辩论。

你想知道最后辩论是怎么结束的吗？我们最终也没有达成一致！我回到自己的座位，用新的设计修好了盒子（他们验证了几个星期，结果证明它是正确的）。我没有再多说一句话，很快就调离了那个部门。同样的设计到现在已经使用了超过10年，相关的文档还特别注明，接线要正确，以免读数不对。这个文档并不是我写的，而是同我辩论的老板写的。有趣的是，自那以后，我们再也没有就欧姆定律发生过争执！

基础知识是最重要的，让我们再重复一遍：“基础知识最重要！”作为电气工程师，欧姆定律是我们将会用到的最基本的原理。它是所有其他定律的基础。电阻的基本性质就是，电阻会阻碍电流的流动。这种阻碍作用会在电阻的两端产生压降，其大小正比于流过电阻中的电流的数值。你可以将电阻想象成一个从电流到电压的转换器，这也许对你的理解有帮助。

有了电阻做基础，现在就让我们来考虑电路中存在的另外两种阻碍作用。尽管后面我们还会对电感和电容作深入的介绍，但目前我们只考虑它们的一个性质，即它们都表现得像一个依赖于信号频率的电阻。将这一点加以考虑之后，欧姆定律就适用于这些元件了，因此你可以很熟练地将欧姆定律重写成以下的新形式

$$V=I\times Z \tag{2-1}$$

不过请注意，这里的阻抗Z表示的是在某个特定频率之下的电阻值。在后面介绍其他基本方程的时候，请务必把这一点放在心上。在任何时候，当你在方程中看到电阻的时候，如果需要考虑信号的频率，那你就可以简单地用阻抗来替换电阻（尽管将阻抗看成电阻不是一种完美的比方，但这可以帮助你对阻抗获得直觉的认识）。

在继续介绍其他的基础之前，我要再作一点说明：你的电路中的每一根导线、每一个元件或材料，以及印刷板上的每一条走线，都包含着电阻、电感、电容这3个“元件”在里面。任何器件都有电阻！任何器件都有电容！任何器件都有电感！现在的问题是：“它们大得足以产生影响吗？”从我自己的经验来看，情况是这样的：若将并联的电阻增大100倍，则将使其影响减小100倍。这样一来，和我们获得的测量结果相比，这种影响就将变得不怎么重要。同样，电容和电感的阻

抗方程将帮助你按照类似的方法，去考虑运行频率的影响，并且你应该问自己："这个等效器件对我正在考虑的问题产生了重要影响吗？"通过判断其重要程度，你将能够对正在检查的电路中存在的问题做出精确的定位。

在前面我讲述的那个辩论经历发生在很多年以前，那是我职业生涯刚开始时的事情。当时我说到，我仍然每6个月就重新"发现"一次欧姆定律。确实，一次又一次，在我解决问题或进行设计时，答案往往可以通过应用欧姆定律来找到。所以，在你准备取出那些高级的理论来解决问题之前，请千万记住：欧姆定律仍然有效！

2.1.2　分压原理

在大多数情况下，我们看到的是用R1和R2来表示的形式。我把它们改成了R_g（代表接地端的R）和R_i（代表靠近输入端的R），以提醒自己哪个是连接到地的，哪个是串联在上方的。如果你接反了，那你得到的输出将是图2-5中R_i两端的电压，而不是输出上的电压（图2-5中R_g所对应的位置上的电压）。在分析这种电路时，若增益[①]看起来不对劲，那有可能是你把两个电阻值交换了位置。

$$V_o = V_i \frac{R_g}{R_g + R_i} \tag{2-2}$$

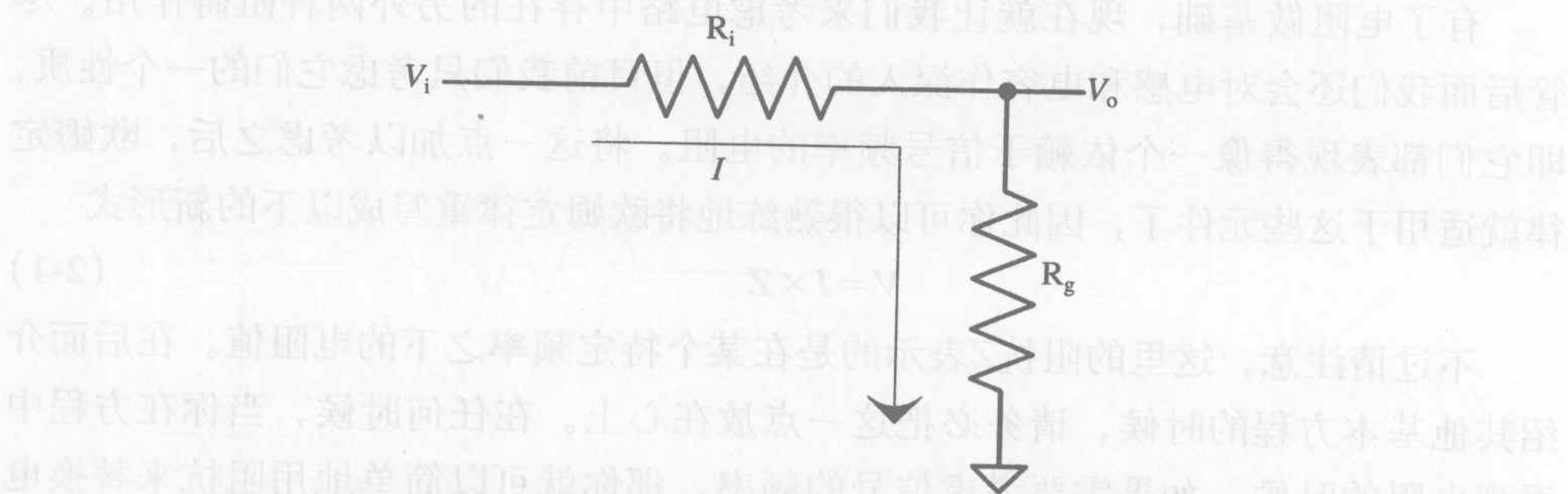


图2-5　输入电压经过分压，输出得到的电压降低了

你也许注意到了，这个电路的增益永远不会大于1。当R_i往零靠近时，增益将趋向于1；当R_g变得特别大时，增益也趋向于1（注意当R_g变大时，R_i值变得不重要）。由于这个特性的缘故，我们可以很自然地将分压器看成是这样一种电路，它的功能是把输入电压的一定百分数传递给输出。当你看到这个电路时，请试着用百分数来看待它。例如，若$R_g = R_i$，那么将仅有50%的电压出现在输出上。如果你需要

① 我喜欢的表示方法是$V_o = V_i \times H$，其中H是电路增益，即$H = R_g/(R_g + R_i)$。当我们将一个电路拆解成较小的部分时，这个表示方法就很有用处。在后面讨论运放时，我们将会用到这种表示方法。

10%的信号，那你将需要一个1/10的增益。因此可以取R_g为1kΩ，取R_i为9kΩ，结果你就得到了一个分压器，它以电阻发热为代价，将90%的信号消耗在电阻上，留下了10%的信号给输出。

对于增益为1/10的情况，你是否注意到了其两个电阻的比值是1:9？这是因为增益的分母是两个电阻值之和。我敢肯定你也注意到了这样一点：若交换两个电阻的阻值，我们将得到9/10或90%的增益。若你能够意识到对于同样的电流，9kΩ的R_i上的压降是1kΩ的R_g上的压降的9倍，那么你应该可以凭直觉就知道上面的结果。换句话说，90%的电压在R_i两端，10%的电压在R_g两端，而R_g的两端就是你要插上探针、测量V_o的地方。分压原理实际上只是欧姆定律的一个扩展，但它是如此重要，因此我将其归入到我们应该牢记的基本方程之中。

2.1.3 电容阻碍电压的变化

让我们考虑一下，如果把前面分压电路中的R_g替换成电容，将会有什么样的结果呢？它还是一个分压电路吗？如果是的话，差别在哪里呢？这时你应该问："嗨，电容不过是一个阻值随频率变化的电阻，这会不会产生出一个依赖频率的分压器呢？"是的，确实是这样，人们通常把这样的电路称为RC电路。下面详细介绍RC电路，如图2-6所示。

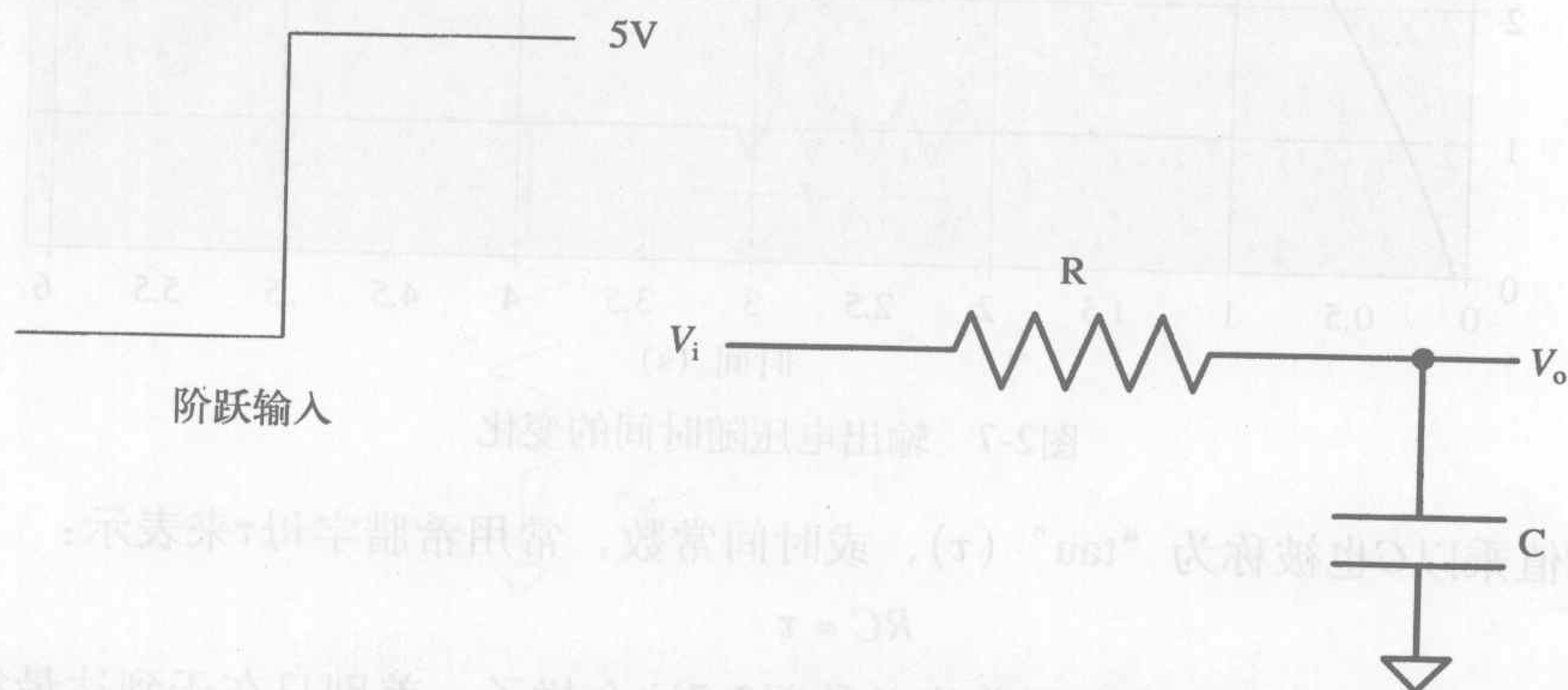


图2-6 阶跃输入施加在简单的RC电路上

利用我们对电阻和电容培养起来的直觉理解，让我们来分析一下RC电路中发生的事情。让我们施加一个阶跃输入。根据定义，阶跃信号就是一个快速的电压改变。电阻不在乎电压的变化，但是电容在乎！电压的这种快速改变可以看成是高频分量[①]，电容对高频信号作出怎样的响应呢？它对高频信号具有低阻抗！有了

① 这是很久以前一个叫Fourier（傅里叶）的人发明的东西。添加的谐波越多，阶跃输入的上升时间就越快。

这些知识，我们现在就可以应用分压原理了。如果R_g的阻抗较低（同R_i相比），V_o处的电压就较低。随着频率的降低，阻抗增大，随着阻抗的增大，根据分压原理，输出的电压就会升高。那么升高到什么时候才会停止呢？根据我们对电容的了解，电容会阻碍电压的变化。阶跃输入是这样的，开始时电压发生一个快速的变化，然后就保持在5V不再变化了。因此电容最终将充电到5V并保持在5V不动。这是合理的吧！这就是RC电路的瞬态响应。这个电路的输出电压变化有一条典型曲线，它由下面的方程描述

$$V_o = V_i\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \tag{2-3}$$

输出的波形如图2-7所示。

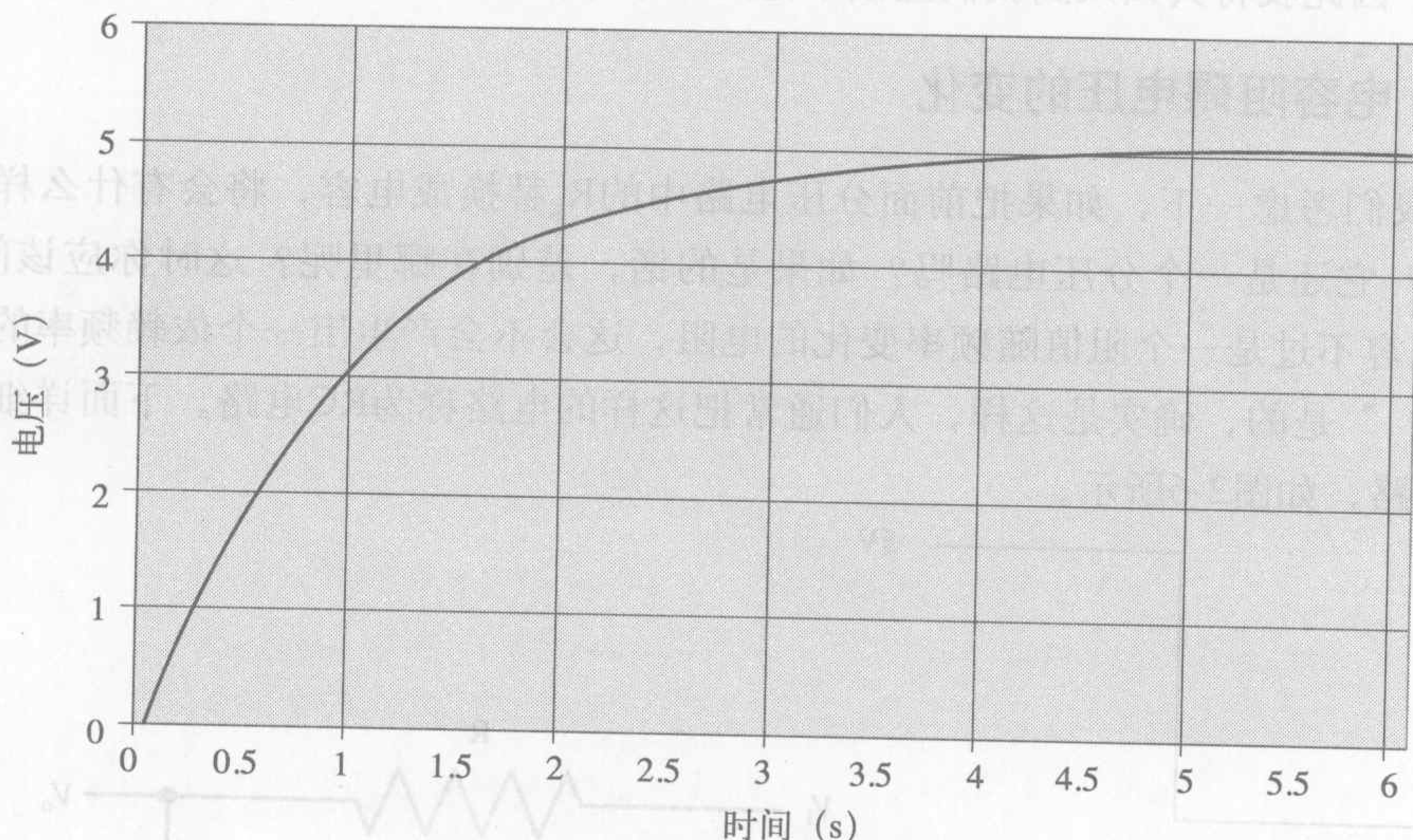


图2-7　输出电压随时间的变化

R值乘以C也被称为“tau”（τ），或时间常数，常用希腊字母τ来表示：

$$RC = \tau \tag{2-4}$$

对于阶跃输入，输出电压曲线总是图2-7这个样子。差别只在于到达最终值所用的时间不同。形状总是相同的，所用的时间则取决于时间常数τ的大小。我们可以用时间常数和最终的电压值来将该曲线归一化。让我们用τ的整数倍作为时间轴的刻度（即以τ为单位），重画该曲线如下（如图2-8所示）。

在1τ时，输出电压上升到63.2%；在2τ时达到86.6%；在3τ时达到95%；在4τ时达到98%；当时间达到5τ时，输出电压已经很靠近100%，可以认为已经达到了100%。

这个响应曲线描述了电子电路这个学科中一个最基础的原理。从几年以前开

始，在对应聘者进行面试时，我就把图2-6所示的RC电路给他们，要求他们画出这个输出电压曲线。在这些年里，令我失望的工程师真是太多了，其中既有刚离开学校的新手，也有工作了多年的人，他们绘不出这个曲线！根据我的记忆，在被我要求绘制该曲线的应聘者中，能够绘的人不到一半。这也是我想写作本书的主要原因之一（另一个原因就是，有人愿意付钱给我来写这本书。否则的话，写书这种做法对我来讲就走得有点太远了）。所以我恳求你们，要坚决把这些知识装入你的记忆中。你要是这样做了，我保证你会成为一个更好的电气工程师。此外，要是我面试你的话，你将多50%的机会获得一份工作。如果你理解了这个电路，你也就会理解电感，这在下一小节马上就可以看到。

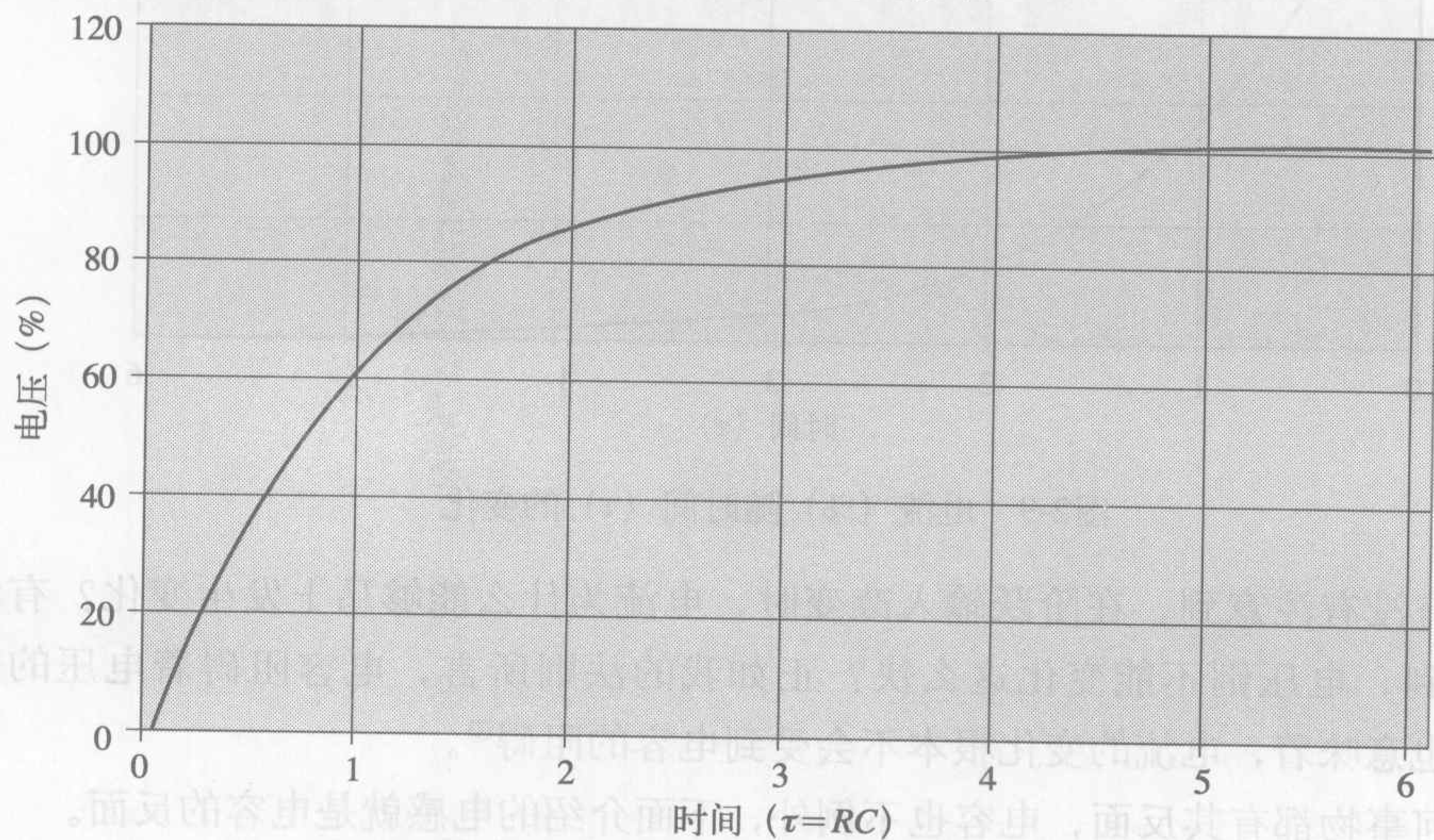


图2-8　输出电压（%）随时间（τ）变化的曲线

在继续介绍之前，我希望你思考一下这个电路中的电流情况。还记得欧姆定律吧？将它应用到这个电路，来分析一下电流会怎样变化。我们已知

$$V = I \times R \tag{2-5}$$

经过少量的代数运算，这个方程转化为

$$I = \frac{V}{R} \tag{2-6}$$

常识告诉我们，在这个电路中，R上的电压等于输入的电压减去输出的电压，写成方程就是

$$V_r = V_i - V_o \tag{2-7}$$

通过前面的学习，我们已经知道在τ的整数倍的时间点上的输出电压的大小。在0τ时，V_o为0，因此全部5V的电压加在电阻上，流过的电流最大。实际上，在这

个时间点上，电容相当于短路到地。在1τ处，V_o是V_i的63.2%，因此V_r是V_i的36.8%。重复这个计算，绘出并连接各点，我们将得到一条跟电压曲线的变化方向相反的曲线，其样子大致如下（如图2-9所示）。

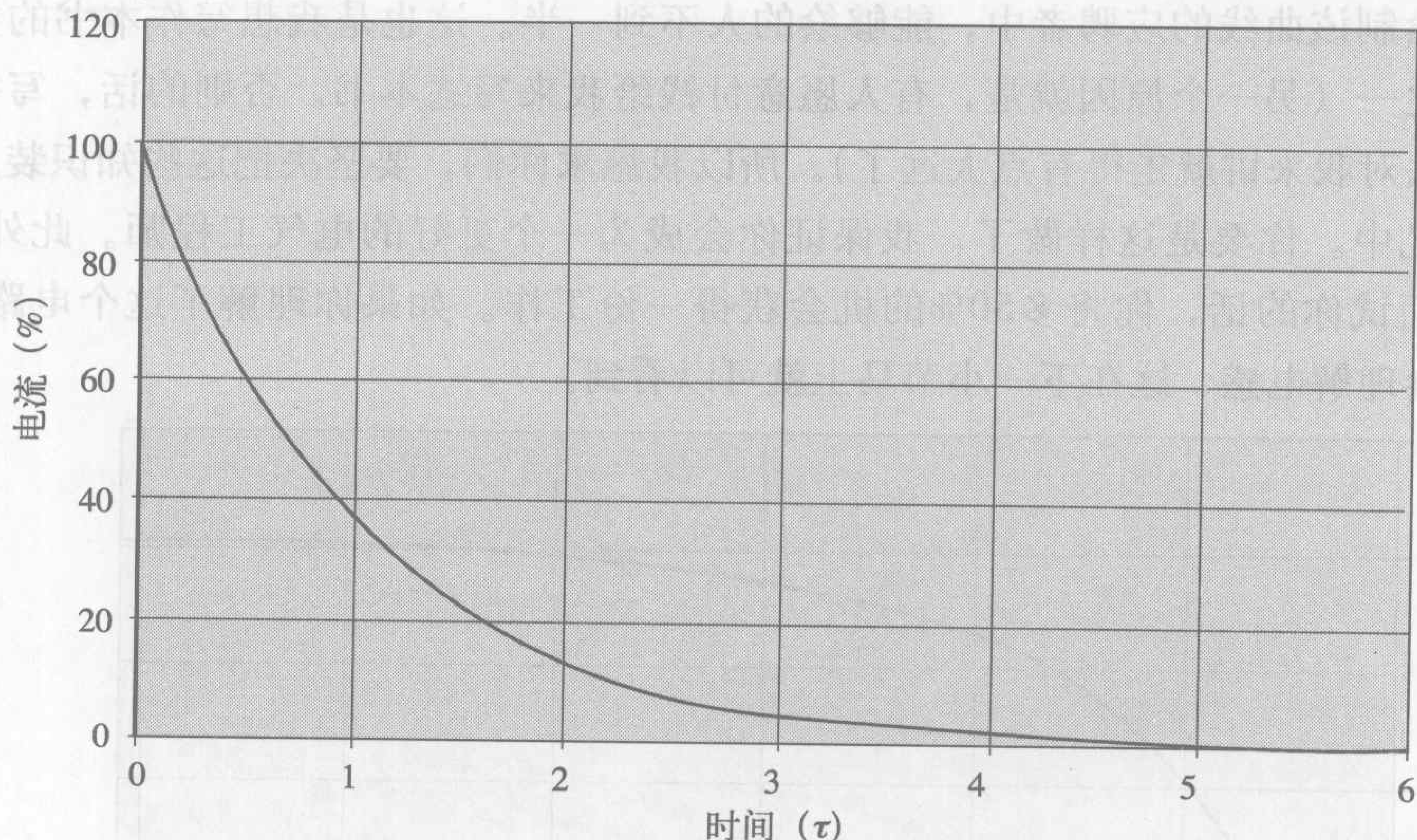


图2-9　电流（%）随时间（τ）的变化

你有没有注意到，在阶跃输入改变时，电流为什么能够马上发生变化？有没有注意到，电压则不能变化这么快？正如我的法则所言，电容阻碍着电压的变化！这也意味着，电流的变化根本不会受到电容的阻碍[①]。

任何事物都有其反面，电容也不例外，下面介绍的电感就是电容的反面。

2.1.4　电感阻碍电流的变化

既然我们已经对RC电路的情况进行了分析，下面就让我们来分析RL电路（如图2-10所示）。

请记住电感阻碍电流的变化，但不会阻碍电压的变化。给RL电路加上跟前面的RC电路一样的阶跃输入，输出电压将马上跳到5V。这样，电感里面的电流最初为0，而两端却有一个电压降，因此电流必然由0开始上升。在RL电路中，电流的响应同RC电路中电压的响应具有完全相同的形式。

由于我们已经弄明白了RC电路的电压响应原理，因此RL电路的电流响应就容易多了。从波形来看，它跟我们已经记住的RC电路的电压响应波形完全相同，因

① 原文为“影响”(affect)。实际上，随着电容的充电或放电，电容对最终的电流以及整个过程中的电流变化还是有影响的。——译者注

此RL电路的电流响应波形如图2-11所示。

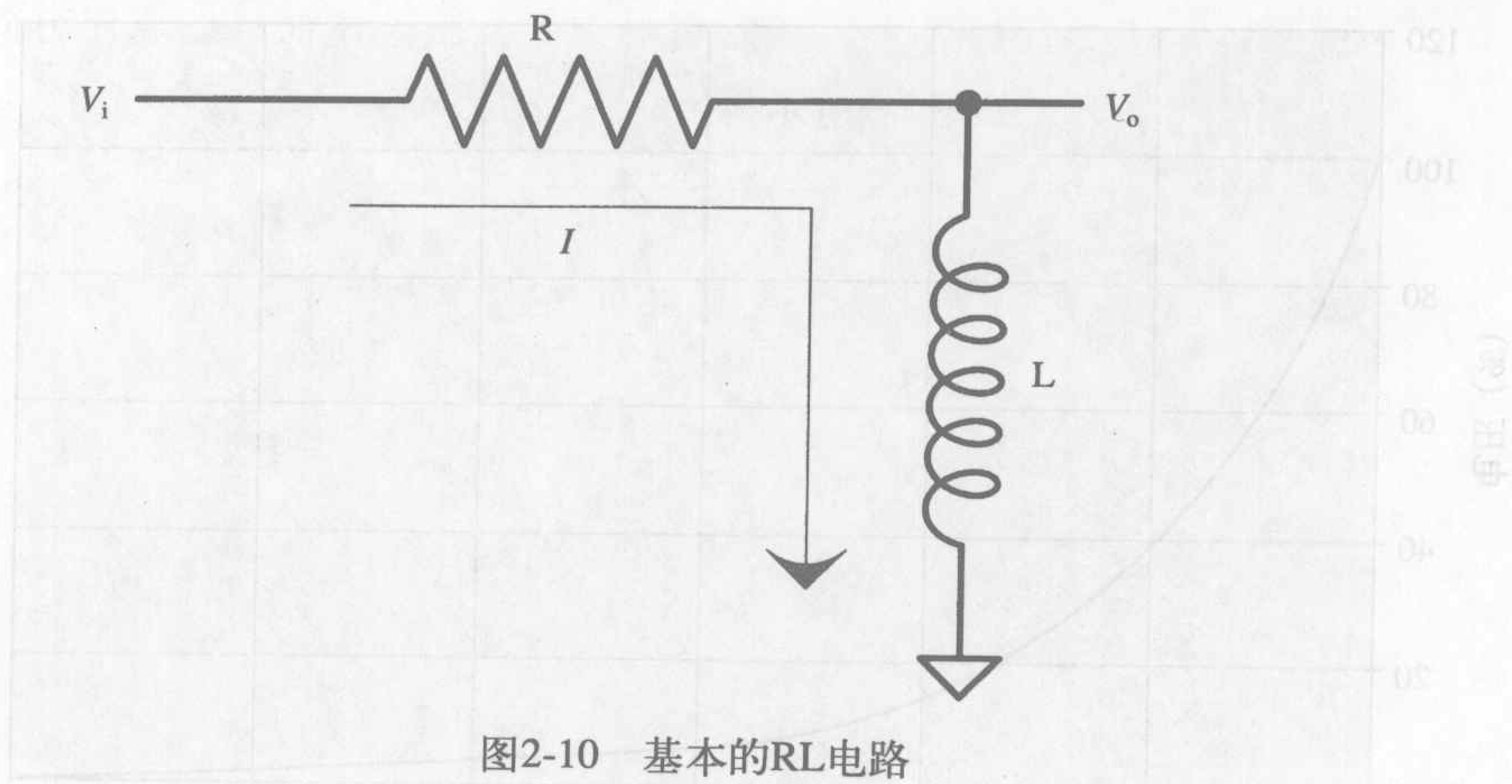


图2-10　基本的RL电路

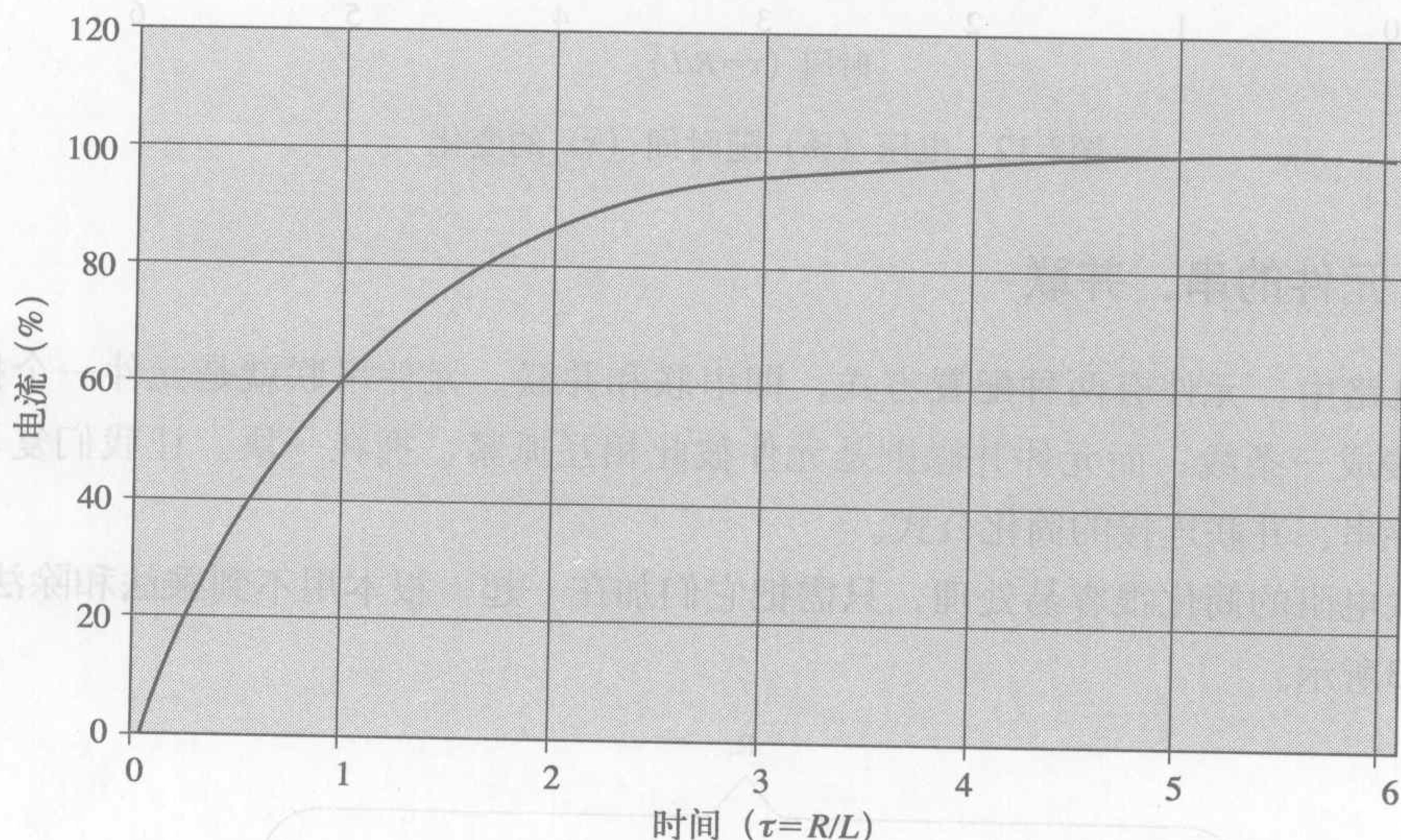


图2-11　电流（%）随时间（τ）的变化

我希望你已经问过自己这个问题："RL电路的电压响应会是什么样子呢？"这时请你考虑一下欧姆定律，并试着画出输出电压的波形。在0时刻的电流是多少呢？稍微晚一点的电流又是多少呢？请记住欧姆定律——小电流意味着大电阻。因此，在开始时，电感就像一个断开的电路，电感两端的电压跟输入电压相同。随着时间的推移，电感的阻抗下降，最终变成短路的状态，电压也就随着下降，电压波形如图2-12所示。

电感是电容的精确互补元件（对偶元件）。电感的电流怎么样变化，电容的电

压就怎么变化；反过来也是如此。

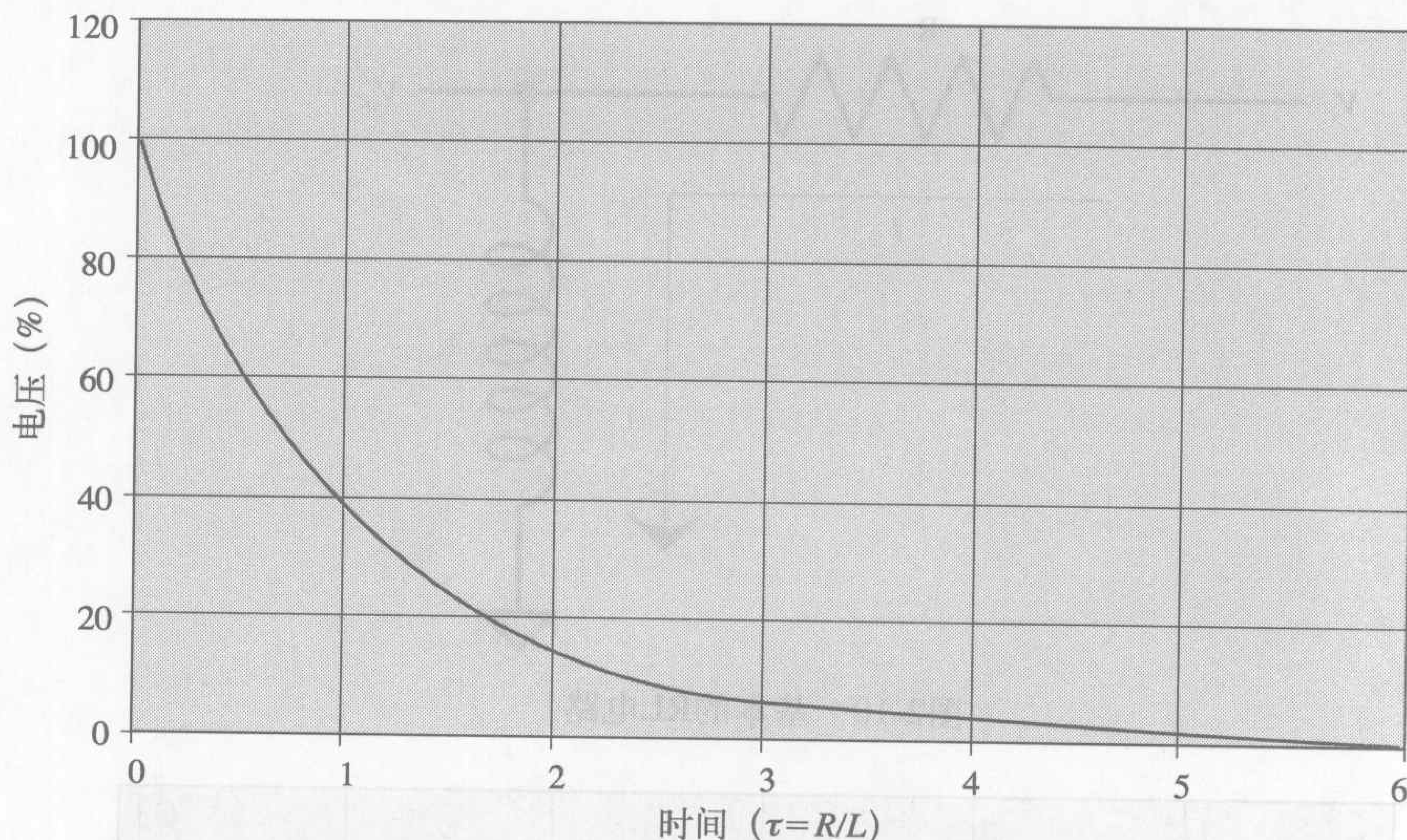


图2-12　电压（%）随时间（τ）的变化

2.1.5　元件的串、并联

在电路中，元件有两种配置方式，即串联和并联。元件串联就是元件一个接一个连接成一条线；而元件并联则是元件彼此相互抓紧，拥在一块。让我们复习一下元件串、并联连接的简化公式。

串联电阻的简化很容易处理，只需把它们加在一起，根本用不到乘法和除法，如图2-13所示。

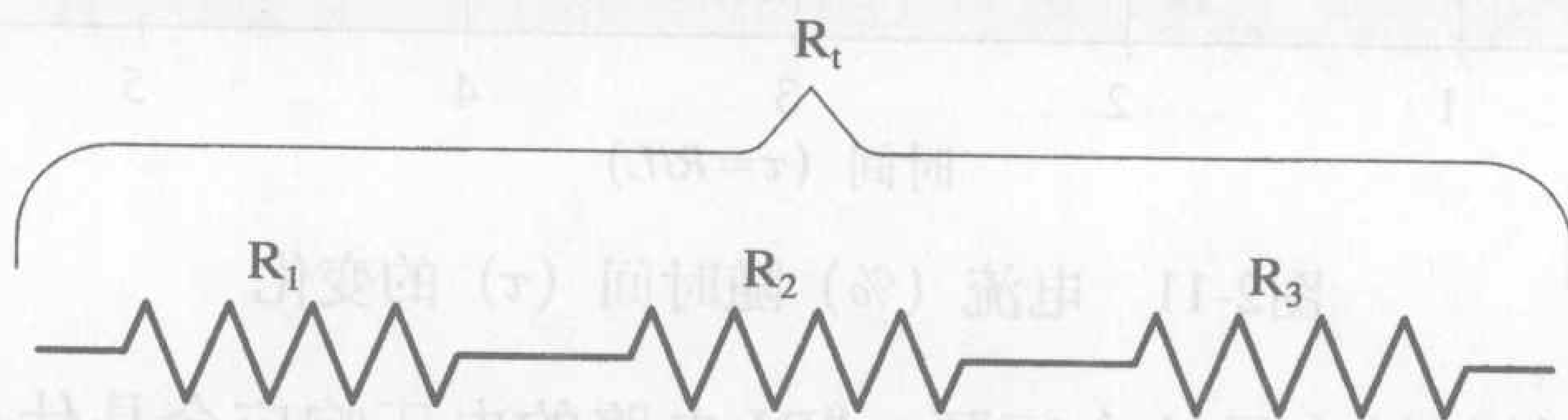


图2-13　串联电阻

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \tag{2-8}$$

电感类似电阻，按同样的方式把串联的电感加在一起即可，如图2-14所示。

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3 \tag{2-9}$$

请记住电容是电感的反面。因此，电容只有在并联时，才能像电阻和电感串联那样进行相加，如图2-15所示。

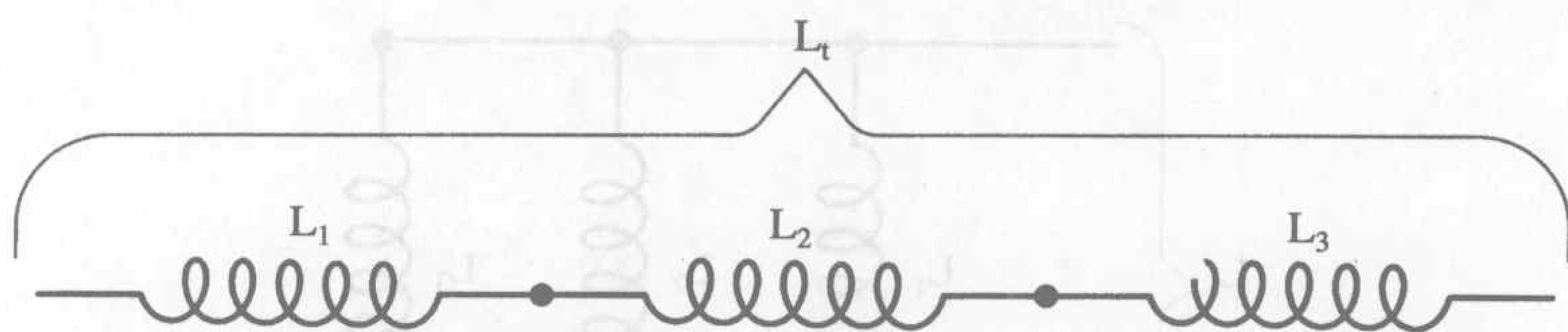


图2-14　串联电感

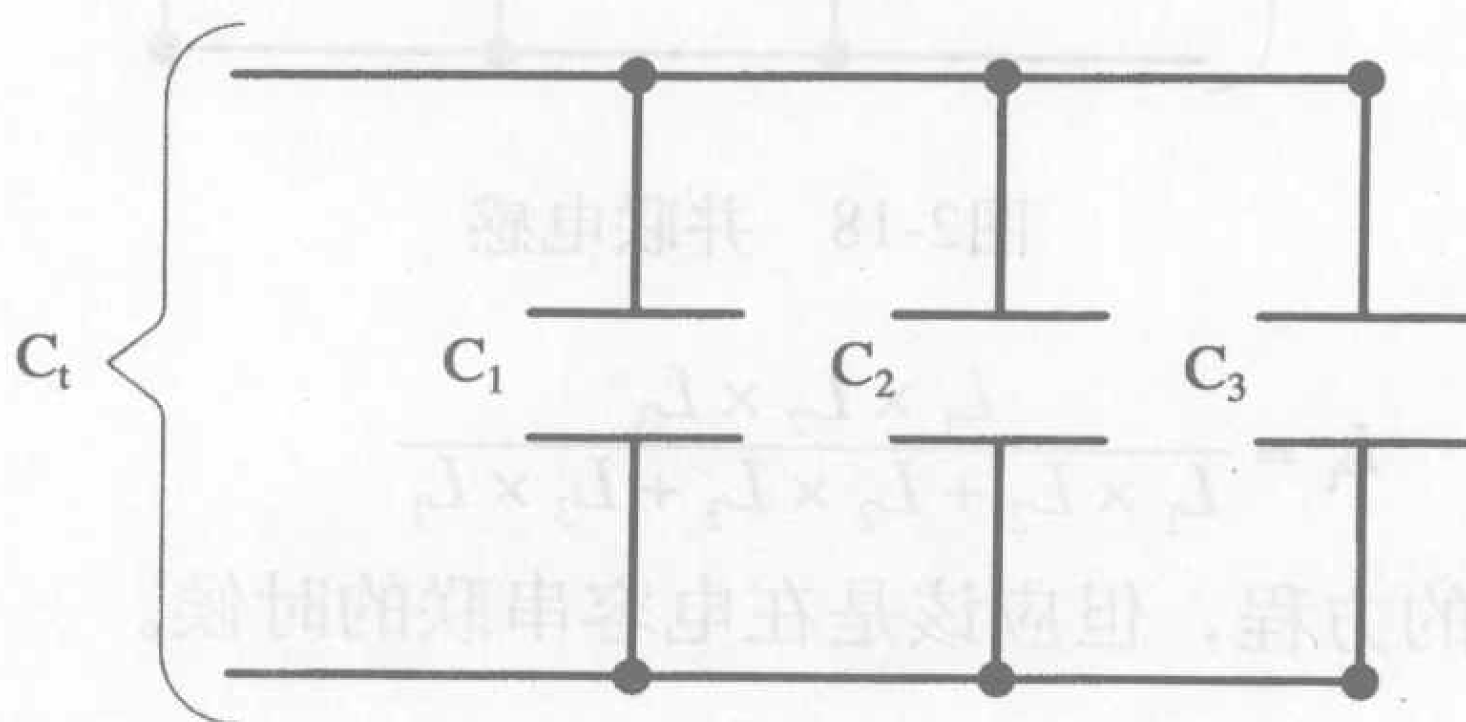


图2-15　并联电容

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 \tag{2-10}$$

请记住下面这些等效的元件连接。

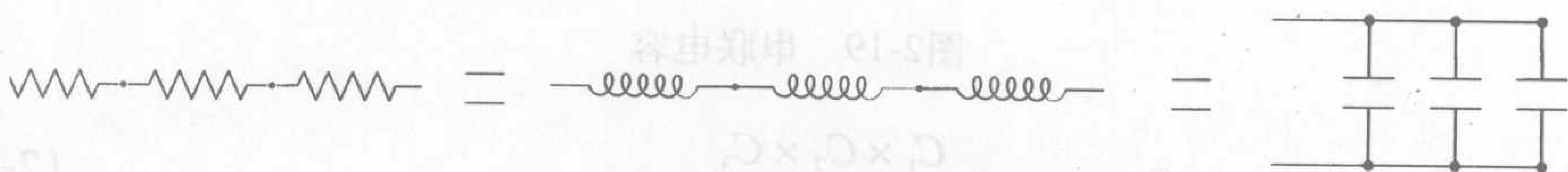


图2-16　等效的元件连接

并联电阻的简化处理稍微有点复杂。其等效电阻可以这样求得：先将所有电阻乘在一起，再除以少一个电阻的乘积之和，参见公式2-11。只是要记住“乘积在上，少一个相乘求和在下”即可。如图2-17所示。

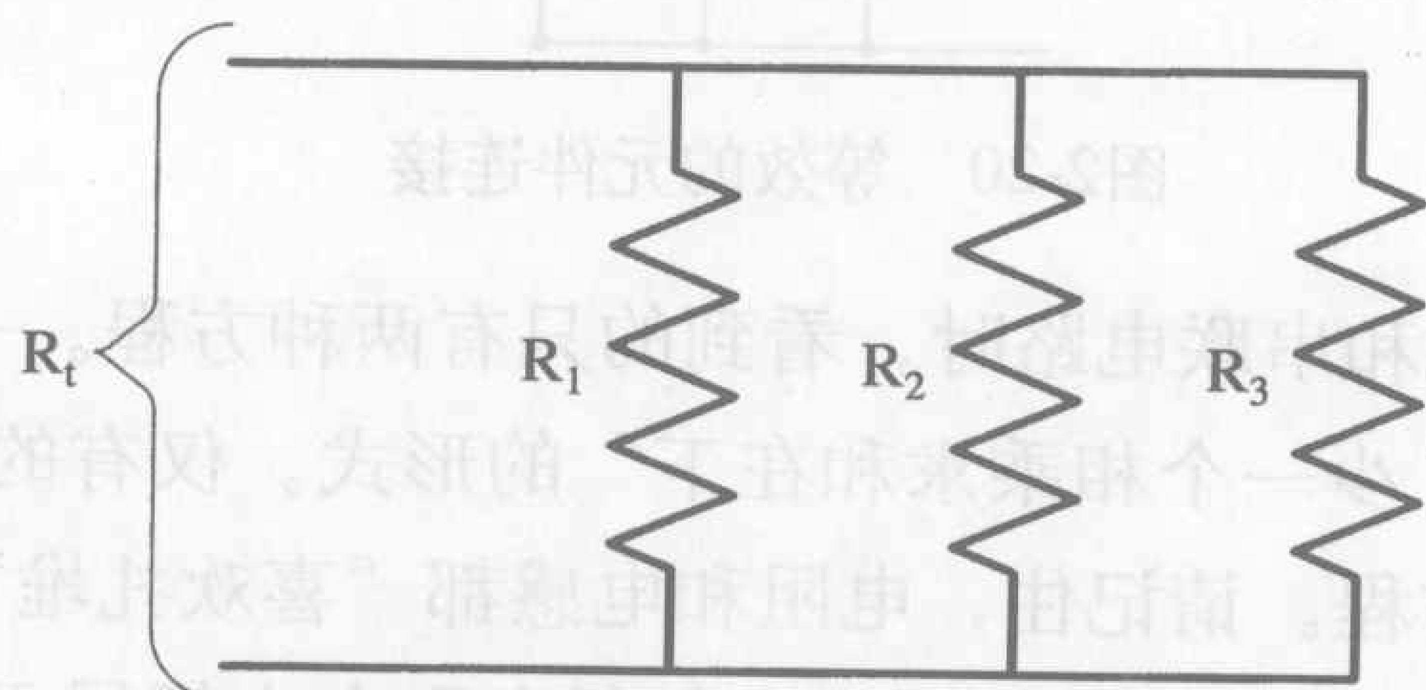


图2-17　并联电阻

$$R_t = \frac{R_1 \times R_2 \times R_3}{R_1 \times R_2 + R_2 \times R_3 + R_3 \times R_1} \tag{2-11}$$

电感的情况又与电阻相同。并联在一起的电感可以用同样的方法来简化。

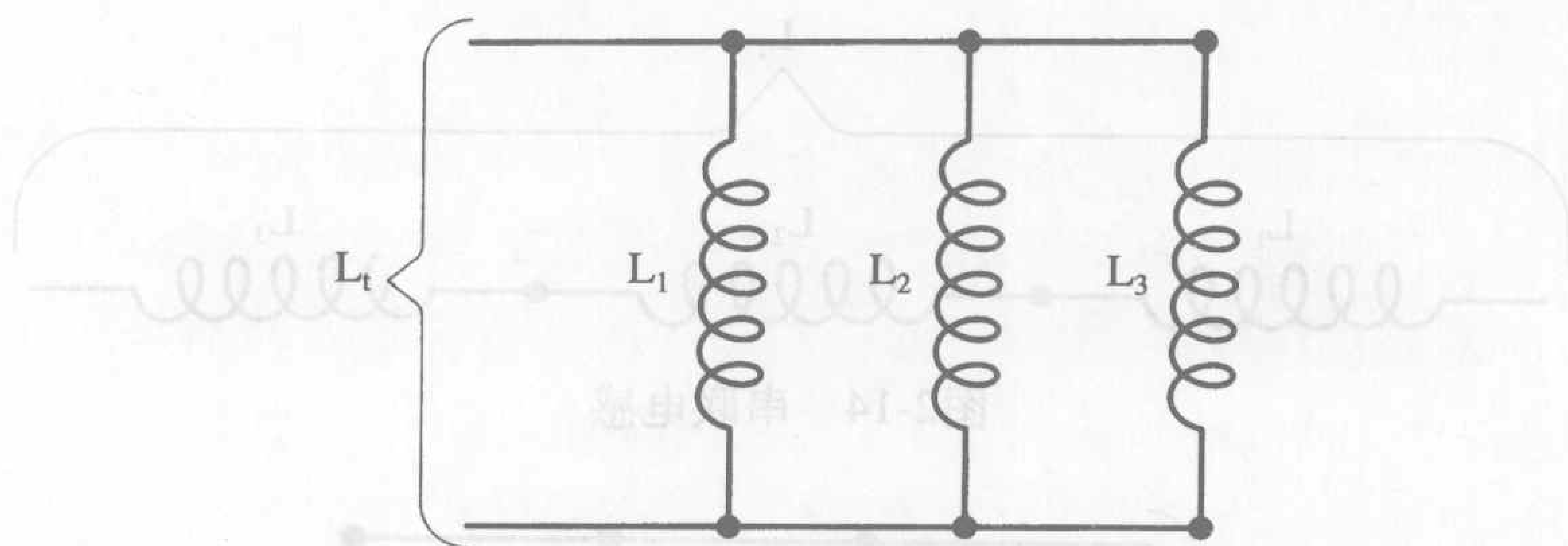


图2-18　并联电感

$$L_t = \frac{L_1 \times L_2 \times L_3}{L_1 \times L_2 + L_2 \times L_3 + L_3 \times L_1} \quad (2\text{-}12)$$

电容也适用同样的方程，但应该是在电容串联的时候。

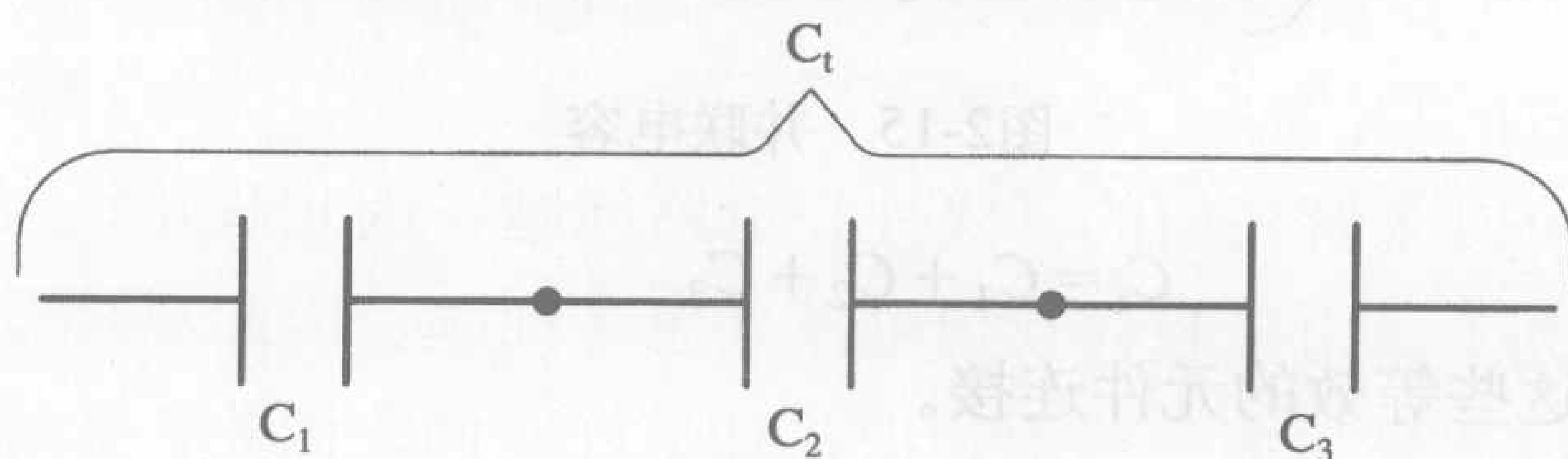


图2-19　串联电容

$$C_t = \frac{C_1 \times C_2 \times C_3}{C_1 \times C_2 + C_2 \times C_3 + C_3 \times C_1} \quad (2\text{-}13)$$

下面列出的就是使用“乘积在上、少一个相乘求和在下”法则①的电路。

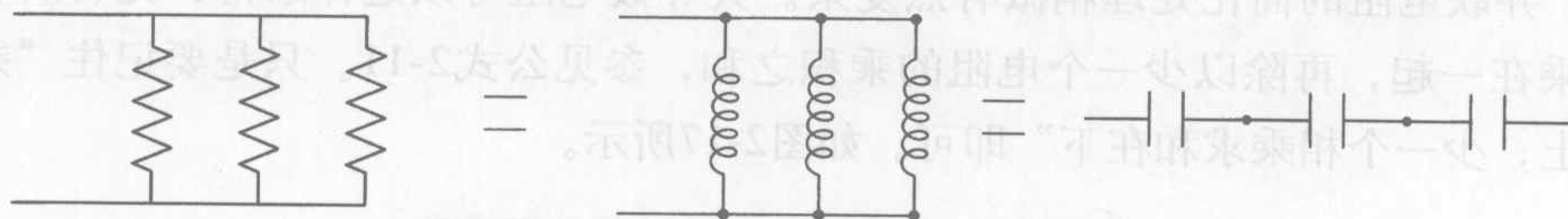


图2-20　等效的元件连接

可见，在处理并联和串联电路时，看到的只有两种方程。一种是简单的相加，另一种是“乘积在上、少一个相乘求和在下”的形式。仅有的技巧就是，要知道什么时候该用哪一种方程。请记住，电阻和电感都“喜欢扎堆”，而电容则同这两个家伙相反，“喜欢离群”。我想大多数工程师在聚会上都属于“电容”这种离群者，因此什么时候该用什么应该不难记住。

① 记住这一点的另一方法就是“1在上、倒数求和在下”（$1/Z_t=1/Z_1+1/Z_2+1/Z_3$）。如果这个对你更起作用的话，那也很好。但请注意只记一个。

2.1.6 戴维南定理

戴维南定理的基础是用叠加原理来分析电路。当一个（微分）方程同时包含有两个不同变量的影响、因而很难进行分析的时候，只要它是线性的（微分）方程，就可以使用叠加技术来求解。（幸运的是，所有的基本元件都是线性的。当我们看到RC电路关于时间的响应曲线时，我们也许想不到它跟线性有什么关系，但它实际上却是一个线性（微分）方程的解[①]。）

叠加的思想其实很简单。当你有很多个输入影响一个输出的时候，你可以独立分析每个输入的影响，并在分析完每一个之后，再把全部的影响加在一起，以观测输出到底是什么。戴维南定理就是从叠加原理获得的一个原理。

利用戴维南定理，我们可以将几乎所有的电路都简化成一个分压器，而分压器怎么求解我们人人都知道，是不是？此外，戴维南定理还有一个姐妹定理，称作诺顿定理，它做的是同样一件事情，只不过它是基于电流而非电压来进行处理的。由于两者都可以求解任何的（线性）电路问题，因此我建议大家将精力集中在其中之一就可以了。由于我喜欢用电压来思考问题，因此更偏爱戴维南电路等效的方法。我们应该只学那些基础知识并且学好它们，因此，我这里将把精力集中在戴维南电路等效上。

当应用戴维南定理进行电路简化时，最重要的法则是：**电压源要短路，电流源要开路**。让我们考虑下面的电路如图2-21所示。

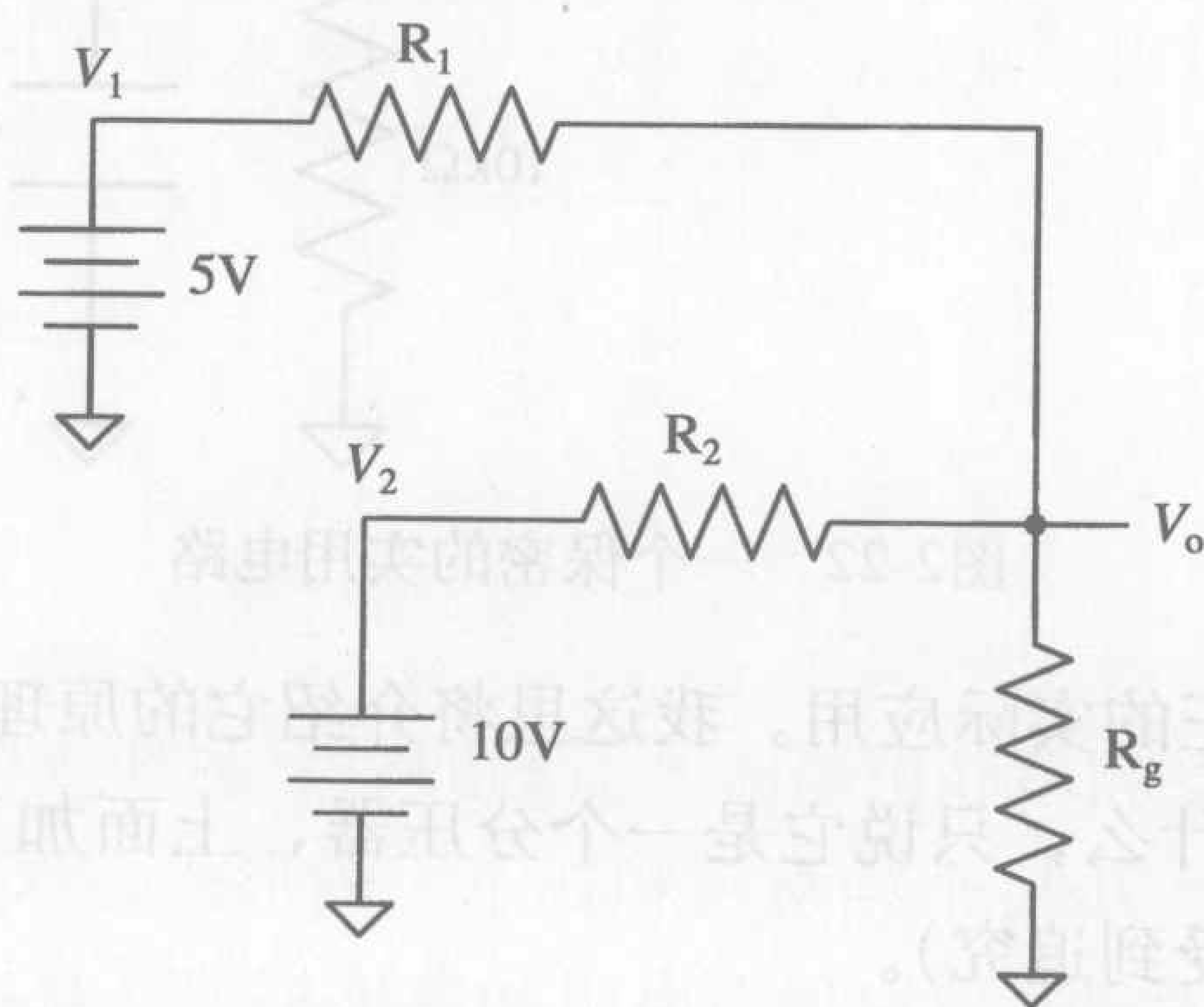


图2-21 含有两个电压源的电路

一旦所有的电压源被短路、所有的电流源被开路，所有的元件都将是串联或

① 当我看到线性（微分）方程这个术语时，我想到的是直线，所以RC电路的响应曲线似乎和我们的直觉相反，但实际上，线性（微分）方程是一种公式，它容许某些规则施加在它的上面，例如叠加。

并联的。对于我们这些只想记忆少量方程的人来讲，这将会使电路的求解十分方便。使用我们刚刚学过的串、并联基本法则，我们将得到一个十分容易理解的电路。一旦我们把电阻、电感以及电容的数目降低到了一个比较容易控制的数量，我们就可以每次一个地考虑所有的电源，以观察各个电源对我们所关注的元件的影响。

一旦我们每次一个地考虑完了每一个电源的影响，我们就可以把各个影响全部加起来，以观察总体的影响。在这个过程中，我们就已经将电路做了戴维南简化，并且把每个电源的输出跟其他电源的输出叠加在了一起，得到了输入组合在一起时的输出。

当我们对电路进行戴维南简化时，要试着想象自己正从电路的输出端往回看电路，这样做将很有帮助。这意味着我们是从输出的角度来想象电路到底像什么样子的。我们往往习惯于从输入端开始考虑电路里面有什么器件、发生了什么、有什么样的信号最后到达了输出端等等。请试着把这样的习惯从头到尾翻过来，想象从输出端向前看，那紧跟着它的到底是什么？这时“看”到的连在它上面的电容阻抗是多少呢？一旦我们能够调整自己的“观点”，戴维南定理就将变成一个更加强大的工具。让我们考虑如图2-22所示的电路。

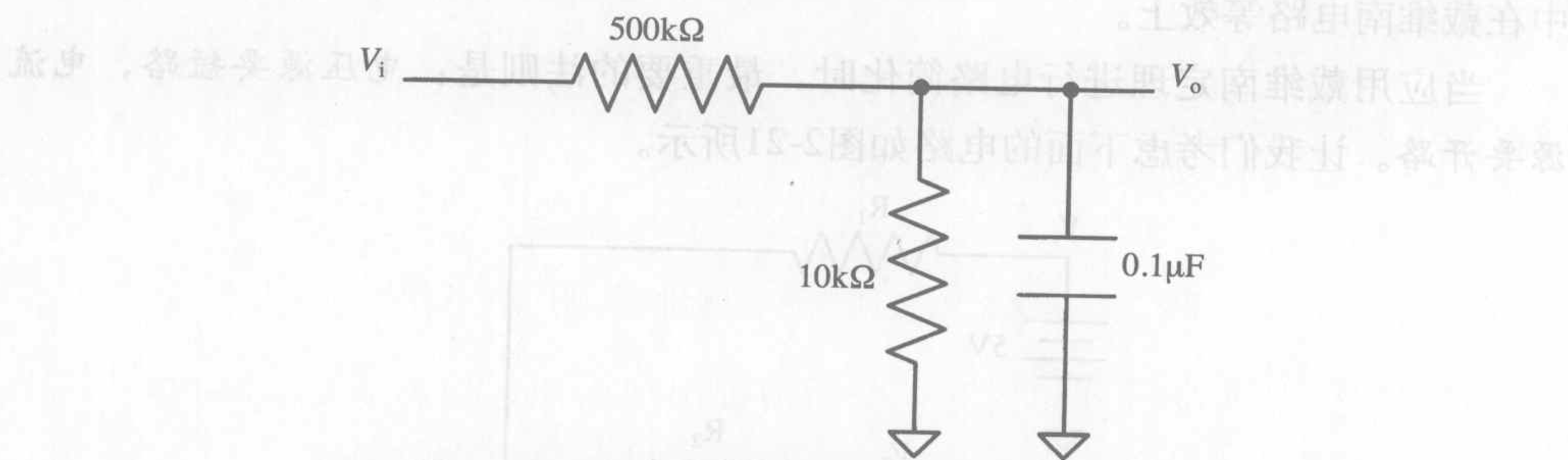


图2-22 一个保密的实用电路

这个电路来自真正的实际应用。我这里将介绍它的原理，但它是保密的[①]。因此我不挑明这具体是什么，只说它是一个分压器，上面加了一个电容滤波器（参数可能有改动，以免受到追究）。

这个电路的任务是将变化范围在0~100V的输入电压降低到0~5V的范围内。此外，输入电压中还有一个交流分量，它将被电容滤掉。我们的问题是，这个电路中的RC滤波器的时间常数到底是多少？

---

① 众所周知，每个公司都希望员工把自己拥有的或曾经拥有的点子签字声明为公司的知识产权。总有一天，那些拥有好点子的人必将起来抗争：“够了够了。”到那时候，我们这些提供咨询服务的人可能都得歇业。

是500kΩ×0.1μF吗？在没学戴维南定理之前，我也是这么想的。在这个电路中，输出的是电容上的电压，因此让我们往回看电路，判断电容上到底并联了什么器件。现在请记住一点，我们称这个电路的输入是一个电压源。让我们在原理图上把这个电压源短路，然后对这个电路进行戴维南简化！

下面就是戴维南简化后的电路，如图2-23所示。

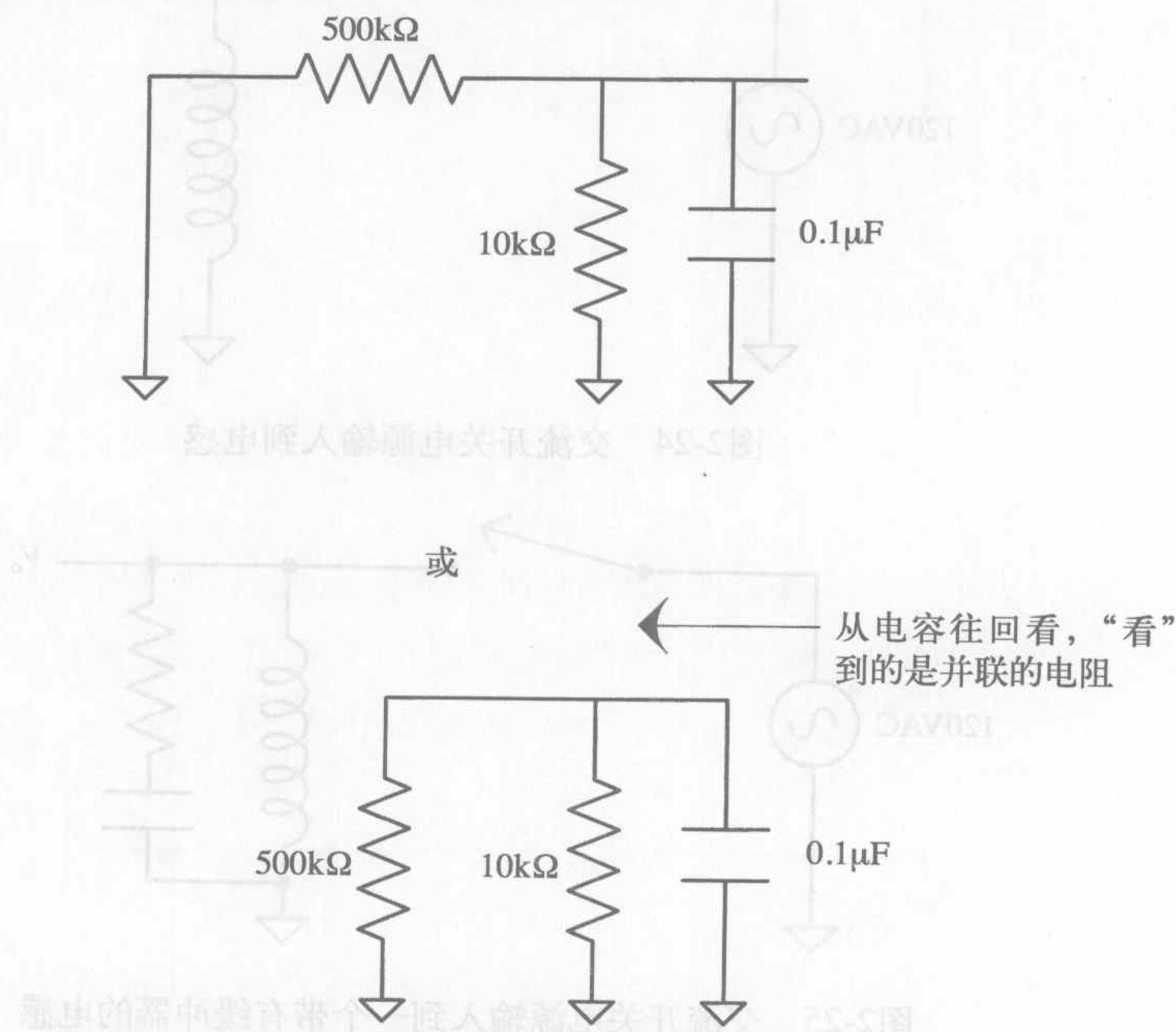


图2-23　保密的实用电路在戴维南简化后的情况

简化到这个地步，可能会有某些新情况出现而使你惊喜不已。从电容来看，10kΩ和500kΩ的电阻是并联的。应用并联电阻的法则，我们发现连接在这个电容上的电阻是9.8kΩ。这是一个远小于500kΩ的电阻，是吧！戴维南简化表明，我们最初的假定错了。实际上，这个电路的时间常数①要比没有10kΩ电阻的情况小了太多太多。

还有其他许多的应用电路也可以用来说明戴维南定理的用处。下面是另一个例子。你可能有类似这样的一个电路，如图2-24所示。

在这个电路中，我们需要对交流电源进行开关，使其通过电感（此处的电感实际上是交流电动机的一个绕组）。这个电路在断开开关的时候存在一个问题。在断开开关时，该电路会产生大量的电磁噪声（在稍后介绍磁场时，我们将解释其中的原因）。解决这个问题的一个标准方法，就是使用一个RC电路，这常被称作

① 如果你没有学过时间常数，那你应该往前翻几页去学。不过就目前来讲，能够理解戴维南定理后面的基本思想就行了，没有必要特别去学时间常数的定义。

缓冲器。缓冲器的特点在于能够缓冲这种（引起电磁噪声的）电压尖峰，并将其转换成热、消耗在电阻上。因此在电感的两端并接一个缓冲器将很起作用，下面是其接法，如图2-25所示。

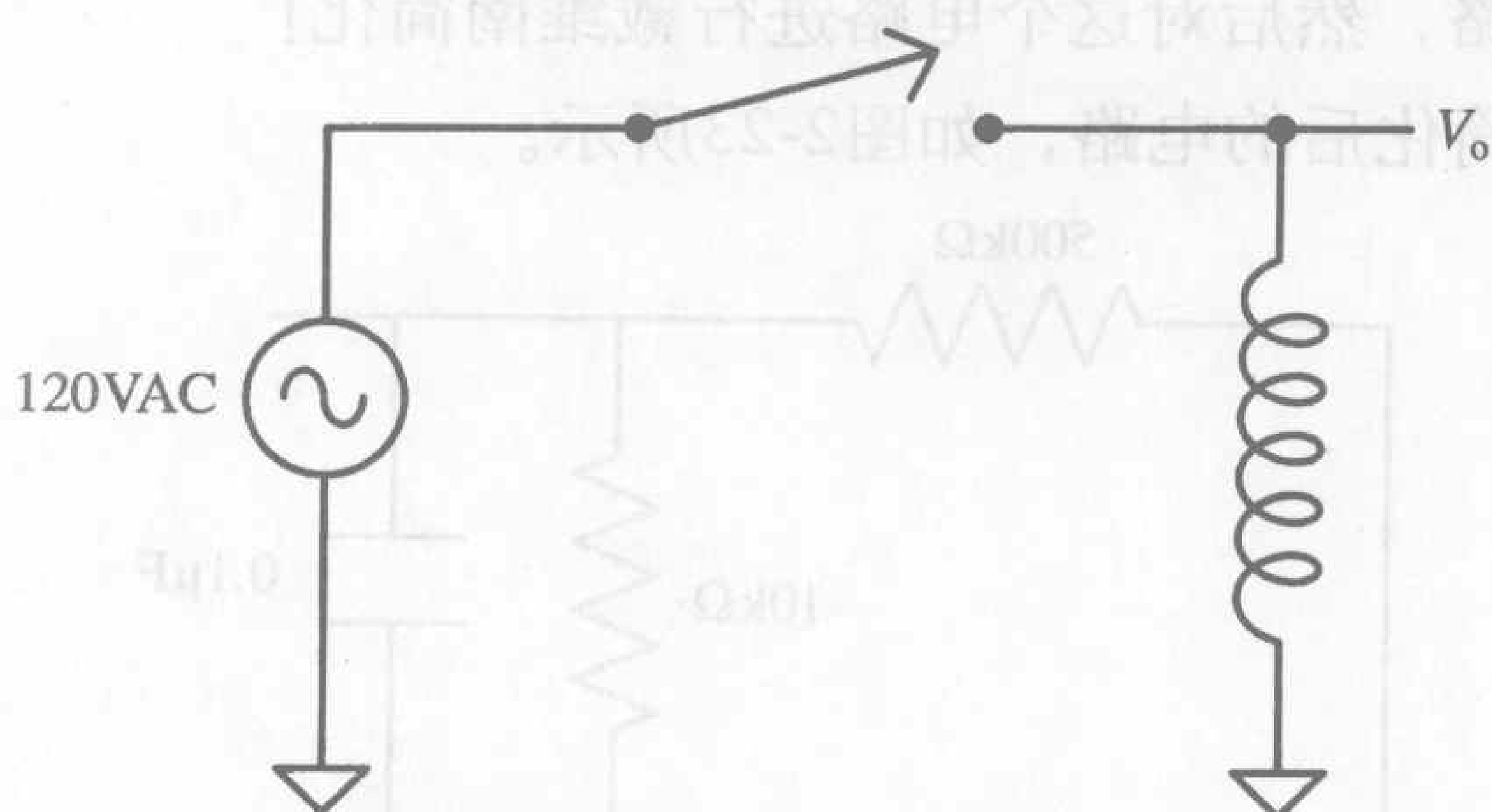


图2-24　交流开关电源输入到电感

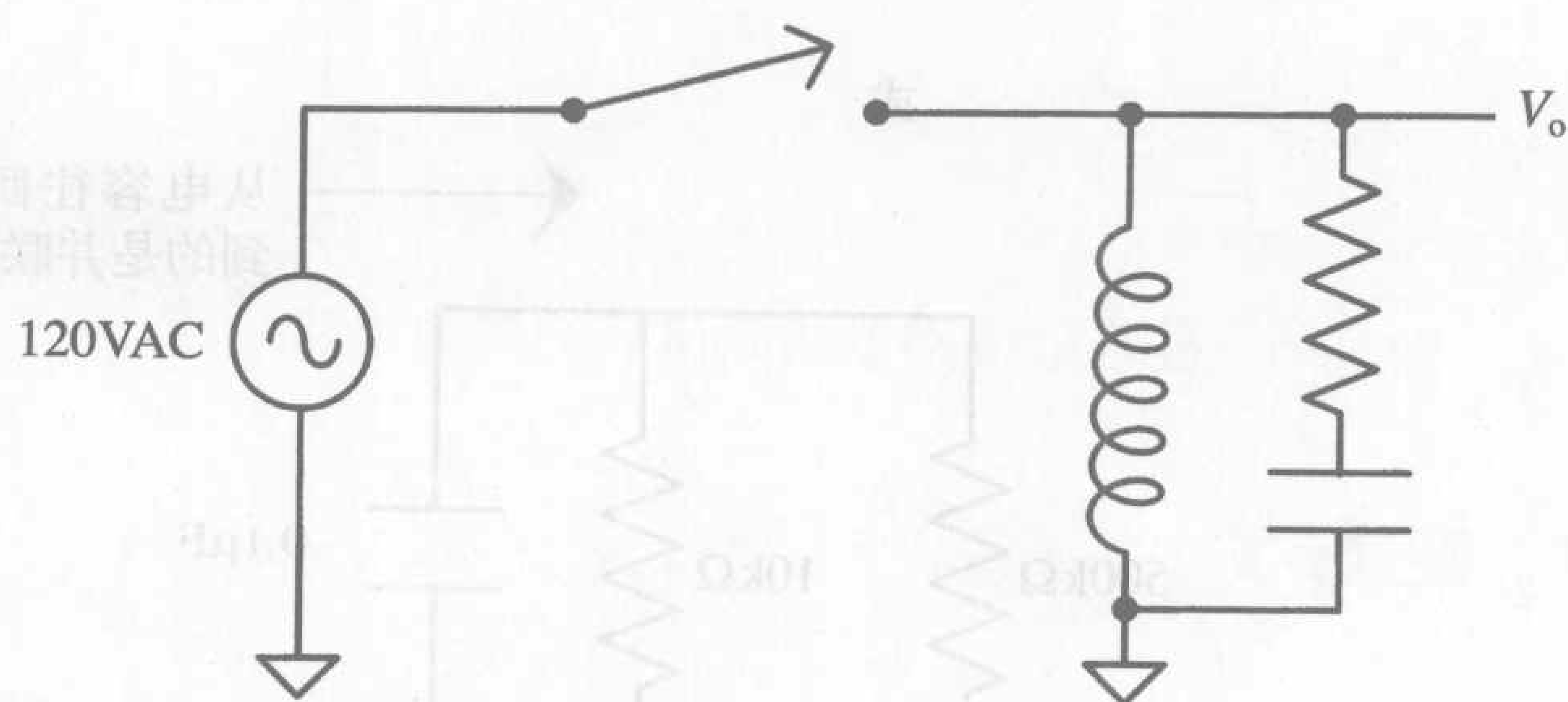


图2-25　交流开关电源输入到一个带有缓冲器的电感

下面让我们应用戴维南定理，从另一个角度来看看这个电路。在将AC电压源短路之后，我们很快可以看出：把缓冲器的下端接在开关的另一端（即交流电源的火线）（如图2-26所示），和把缓冲器接在电感的两端具有完全相同的效果。我所工作过的一个公司曾利用这个事实，把缓冲器接在开关的两端，因而节省了数万美元的费用。我认为光这一点就足以证明，戴维南定理确实是个十分强大的工具。你能没有同感吗？

经验法则

- 基本原理是最重要的。
- 阻抗是在给定频率下的"电阻"。
- $V = I \times Z$。
- 分压原理：$V_o = V_i \times R_g/(R_g + R_i)$。
- 电容阻碍电压的变化，但是电流可以立即改变（是电感的反面）。

- 电感阻碍电流的变化，但是电压可以立即改变（是电容的反面）。
- 电容对电压的作用，跟电感对电流的作用相同。
- 串联电阻、串联电感，以及并联电容用加法。
- 并联电阻、并联电感以及串联电容使用“乘法在上、少1个相乘求和在下”的法则。
- 做戴维南电路简化时，短路电压源、断开电流源。
- 从输出端的角度考虑电路。
- 对电路进行戴维南简化，可以洞察电路。

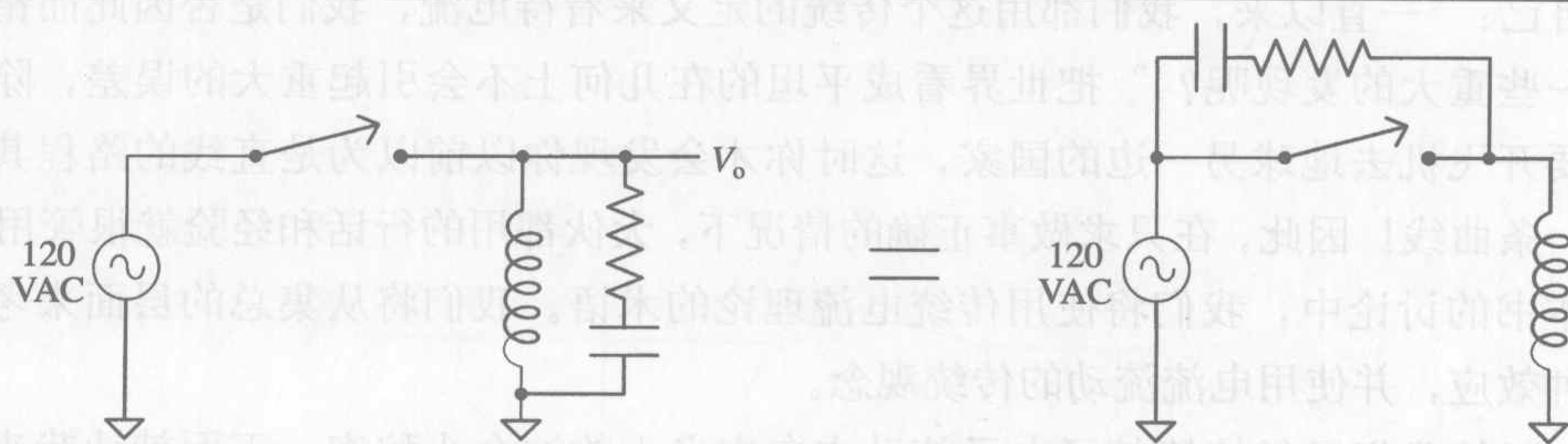


图2-26 进行戴维南电路简化后的等效电路

2.2 这些与频率有关

2.2.1 AC/DC与一个小秘密

AC/DC不是某个摇滚乐队的名字[①]，而是众多可爱的工程缩略语中的一个。它表示交流和直流。这两个术语用于描述两种不同模式的电力。无论你从事的是哪个工程领域，对这两种模式的全面理解都会对你有帮助。在介绍这两种模式之前，我们需要先理解什么是传统电流（conventional flow），什么是电子流（electron flow）。

很久以前，在人类甚至还不知道有电子的时候，电被认为是能量的流动。Benjamin Franklin[②]为这种“流动”选定了一个方向，并标记其一端为正，另外一端为负（这件事情详细介绍起来是一个完整的故事，它牵涉到蜡、羊毛，还有进行大量的摩擦）。他的假定很有道理，但后来当人们理解了什么是电子的时候，发现电其实不是真正的流动，而电子的实际流动方向则正好与他规定的方向相反。

事实是，产生所谓“电”的小电子并不是一种连续的能量流动。这些小“包

① AC/DC也是一个著名的澳大利亚摇滚乐队名，该乐队成立于20世纪70年代，目前仍在制作新专辑。——编者注

② 即本杰明·富兰克林，他是18世纪美国的政治家、科学家、发明家和外交家，曾经进行多项关于“电”的实验，并且发明了避雷针。——编者注

裹”围绕在原子核的周围，在做着来回的碰撞。不过，从总体的层面来看，这些量子[①]包裹可以表现为能量的流动。但即便这样，这些电荷也是沿着Franklin所假定的相反方向运动的。

当搞清了所有这些之后，传统电流从正到负的规定也就很好地在我们脑袋里建立了起来。由于基本方程在无论哪种方向定义下都是成立的，也就没有人自找麻烦想去改变这种习惯的方向定义。不过，人们引入了另外一个术语，就是电子流，以描述电路中电子的实际运动方向。

当我第一次知道这个事实时，感觉这有点像个不可告人的秘密，并且我时常问自己：“一直以来，我们都用这个传统的定义来看待电流，我们是否因此而错过了一些重大的发现呢？”把世界看成平坦的在几何上不会引起重大的误差，除非你要开飞机去地球另一边的国家，这时你才会发现你以前以为是直线的路程其实是一条曲线！因此，在只求做事正确的情况下，大伙都用的行话和经验就很管用[②]。在本书的讨论中，我们将使用传统电流理论的术语。我们将从集总的层面来考虑各种效应，并使用电流流动的传统观念。

既然我们已经搞清楚了电子流动方向定义上的这个小秘密，下面就让我来谈谈电流、电压以及它们的来历。

2.2.2　恒定电压源与恒定电流源

引起电子流动的设备称为电源，因为它们是电子流的来源。有两种典型的电源：电压源和电流源。同电源打交道时，需要记住两件重要事情。

第一，对于电压源，电源输出到负载两端的电压将试图维持不变。这就是说，电源上的电压是恒定的。从欧姆定律来看，这意味着电源上的V保持恒定，I和R可以变化，但I和R的乘积必须等于V，即$V=IR$。

第二，对于电流源，电源输出到负载的电流将试图维持不变。也就是来自电源的电流将保持不变。这并不常见，但确实存在，并且可以在许多场合得到应用。在这种情况下，来自电源的电流保持不变，而容许V跟着R变化，并且跟任何其他电路一样，也遵从欧姆定律，即$I=V/R$。

电子学的世界是一个以电压为中心的世界，所以我们看到电压源的频率要比看到电流源的频率高得多。因此，我将更加偏重电压源的介绍。

电源还可以分成两种不同的类型：直流和交流。下面将做具体介绍。

① 量子力学是一个有趣但却完全无关的主题，只好留在以后介绍。

② 不要因此而停止怀疑，也许你会发现某种新东西！

2.2.3 直流

*直流*这个术语用来描述仅往一个方向流动的电流。由于直流的这一特点最容易理解，所以先从这个地方开始介绍。

直流仅沿一个方向流，即从正到负[①]。电池是最常见的直流设备，将其接在电阻之类的负载两端，就会有电流流过，情况如图2-27所示。

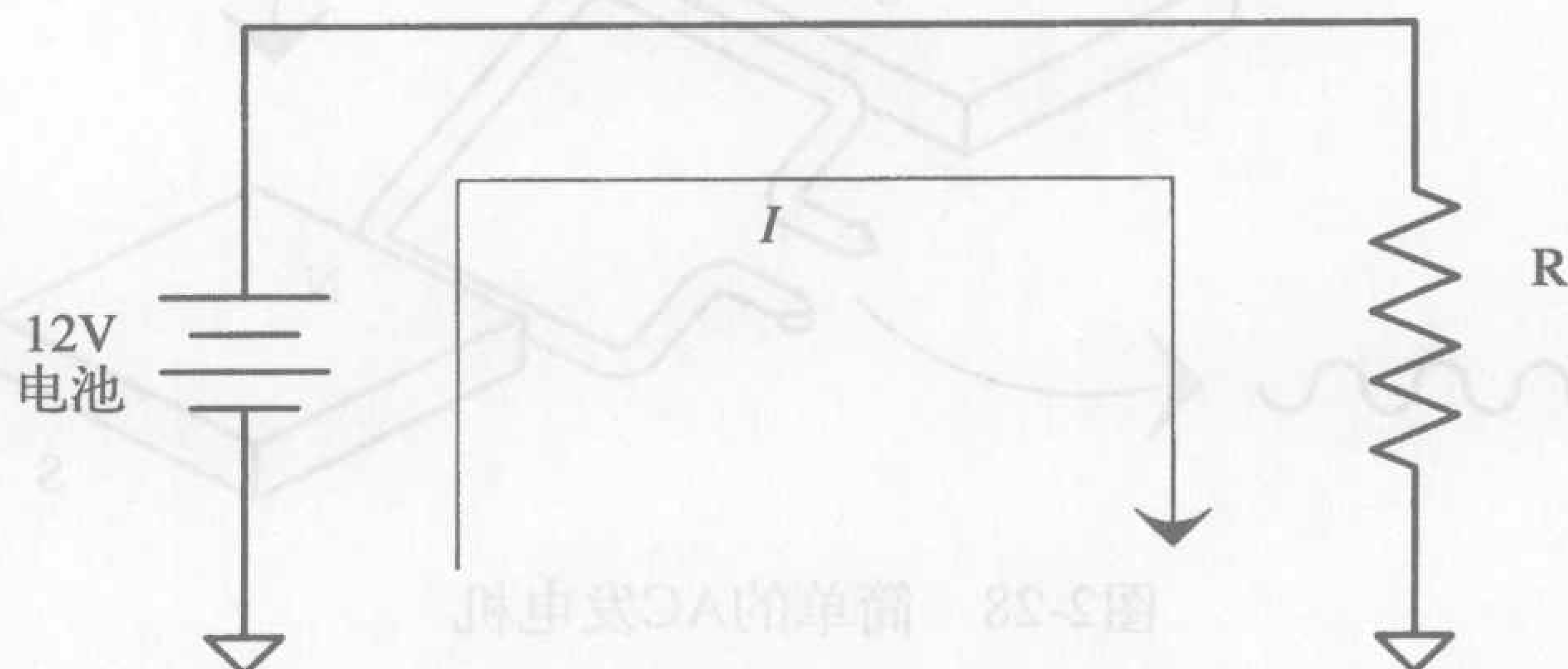


图2-27 电池产生的DC电流和电压

电池也是恒压源设备，所以在需要电流来维持输出电压的地方，就可以使用电池。在图2-27中，我们已经在1Ω的电阻两端接了一个12V的电池——我们刚刚学了如何计算这种简单电路中的电流，是不是？只需随便在纸上划几下，就可以知道其电流是12A。

直流电源总试图沿着同一个方向输送电流。需要注意的一点是，从一个电源出来的电流，总是要以某种方式返回到那个电源。我们应该把原理图上的接地点看成是一个标记，它将信号电流接回到电源。如果信号没有接回到电源，也就不会有电流流出[②]。

2.2.4 交流

在某个科学家发现磁铁和电的相互作用的时候，发明了交流（AC）。在AC电路中，电流重复地每隔一段时间就改变一次方向。这就意味着，当电流流动并增大到一个峰值后，然后将降低到零，然后将再沿相反的方向增大到一个峰值，然后再返回到零，并且这一过程将不断重复。这个电流将以正弦的方式交替地改变流动的方向，因此理所当然该称作*交流电流*（alternating current）。这种电流大都来自你家附近的水电站（或火电站）中的大型交流（同步）发电机。

① 这里用的是传统的电流方向定义。

② 有人喜欢怀疑这一点，如果你想知道更多，请在因特网上搜索一下“free energy”，但请注意，其中多数都是胡言乱语。不过这并不意味着它们不值得读，它们有可能是很幽默、富于启发的。

交流功率由于很容易产生，因而奠定了其存在的基础。如图2-28所示，当我们在磁铁间转动一个金属线圈时，随着遇到的磁场强度的增大，电流先上升，然后随着磁场的减小及极性的改变，电流也减小并改变极性。因此，当线圈在磁铁的场区中转动时，电压和电流自然地按正弦方式变化。

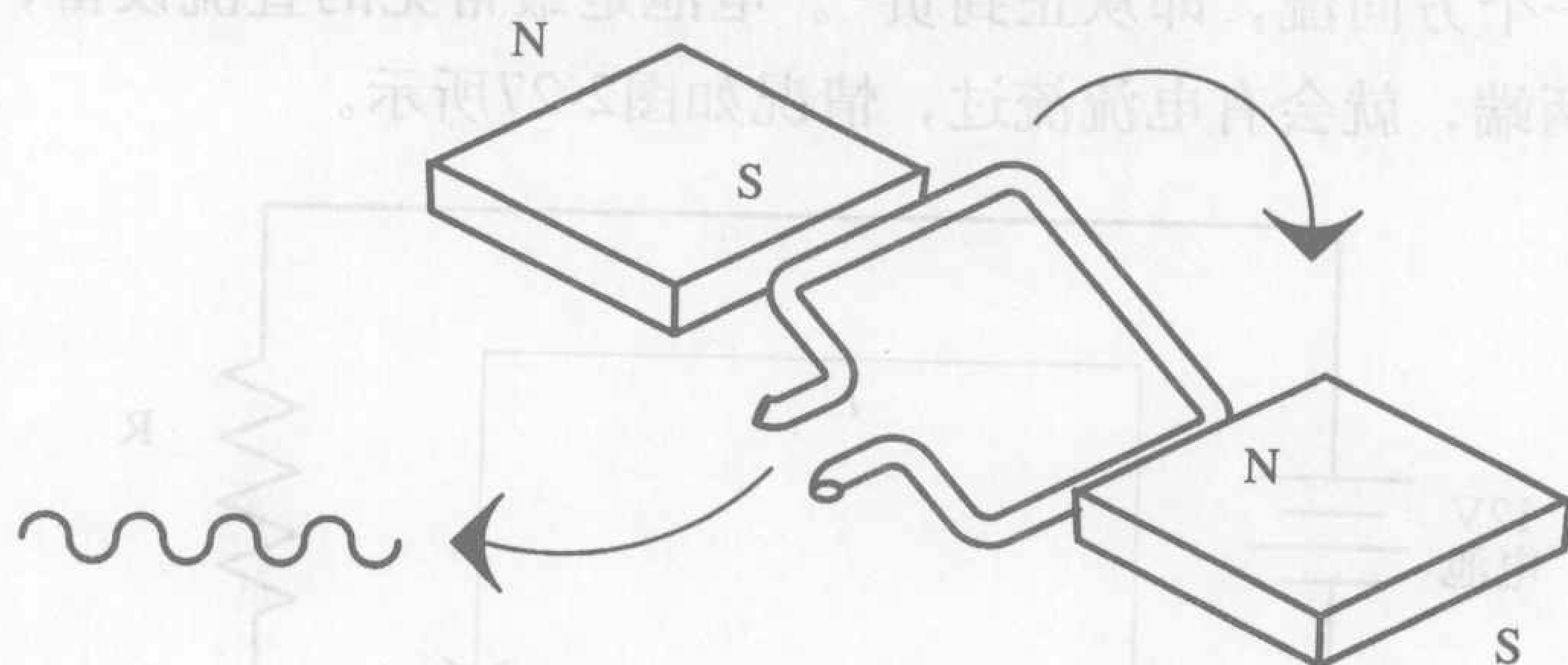


图2-28 简单的AC发电机

只要你不断地转动线圈，AC功率就将不断地产生出来。

- 在电路原理图中，我们用带圈的正弦波符号来表示AC电源，如图2-29所示。

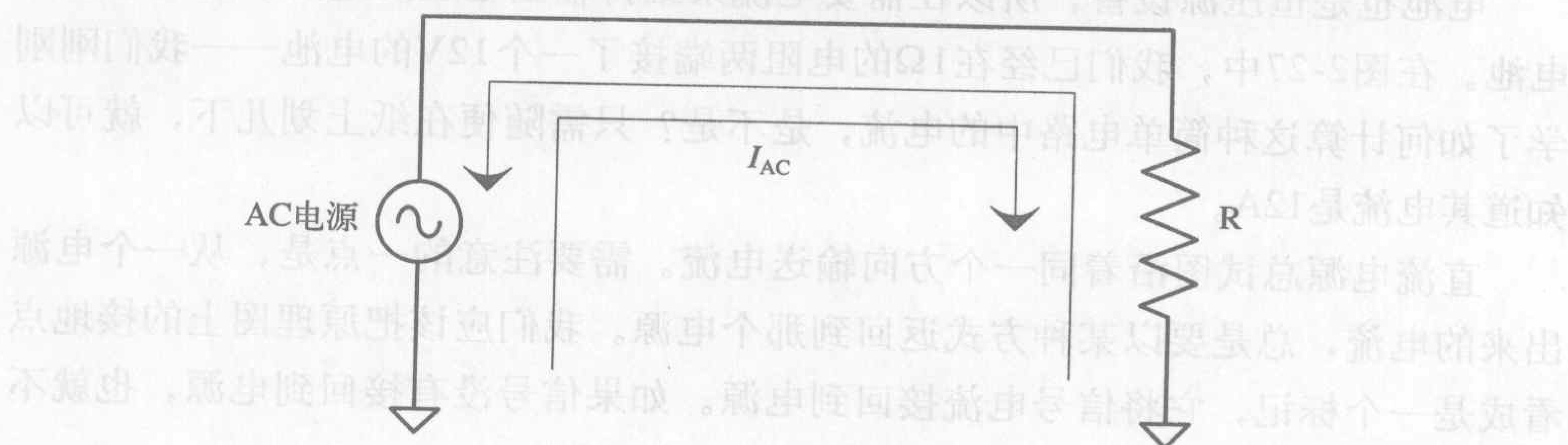


图2-29 AC电压源和电流源

有件趣事值得一提，就是当人们计划在全美国范围内输送电力时，发生了一些争论。著名的爱迪生（灯泡的发明人）想在每个人家里安装小型直流发电机，而另一个不怎么出名的天才——特斯拉（Tesla），则极力主张从某个中心位置用电线来输送交流电。交流的好处在于，其电压可以从一个等级（通过变压器）很容易地转换到另外一个等级。这样一来，它就可以将电压升得很高，因此即使输电距离很长，输电线的电阻也不会产生很大的损耗。关于什么才是最好的方案，人们进行了大量的辩论。使天平倾向我们现在仍在使用的交流电一边的一个因素，就是特斯拉发明了AC电动机。在这之前，可以使用的只有直流电动机，由于那时还没有二极管，因此不容易将AC转换成DC，所以电源能否驱动电动机是一件大事。虽然没有爱迪生出名，但特斯拉却给人类留下了交流输电及交流电动机这份

巨大的遗产。环顾一下你的房子，数一下看看有多少交流电机吧（当然，你也会看到几个灯泡）！

2.2.5 回到电容和电感

电容的经验法则是什么？电容阻碍电压的变化！还记得电感的法则吗？电感阻碍电流的变化！这两个法则的另一面是，电容将容许电流爱怎么变化就怎么变化，电感将容许电压爱怎么变化就怎么变化。当我们谈论交流电源时，你不能忽视的一个事实是，交流电压和交流电流总在变化。它们变化的快慢用“频率”来表示。频率是每秒钟变化的周期数，其单位是赫兹（Hz）。频率越高，电压和电流的变化就越快。现在推想一下，在交流电路中，电容会起什么作用呢？电容将阻止零频率的电流（例如DC电池），而让变化的电流通过！相反的情况则发生在电感上。

我喜欢这样来看待上述现象：电容在DC或零频率时是无穷大的电阻。随着频率的升高，电容的“电阻”（从技术上讲应该称“电抗”）变得越来越低，不断往零靠近。我们把这个电容性的电抗记作X_C，用下面的方程来描述（单位是欧姆，跟电阻相同）

$$\chi_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{2-14}$$

电感正好相反，它从零频率时的0Ω“电阻”开始，随着频率的增加，电感的电阻逐渐趋向无穷大。电感性的电抗记作X_L，其遵从的方程为

$$\chi_L = 2\pi fL \tag{2-15}$$

让我们把电容、电感接到交流电源上（如图2-30所示），改变频率，看看流过的电流所受的影响是什么样的（如图2-31所示）。这个分析很容易在电子表格中进行，只需将相应的电抗公式代入欧姆定律即可。

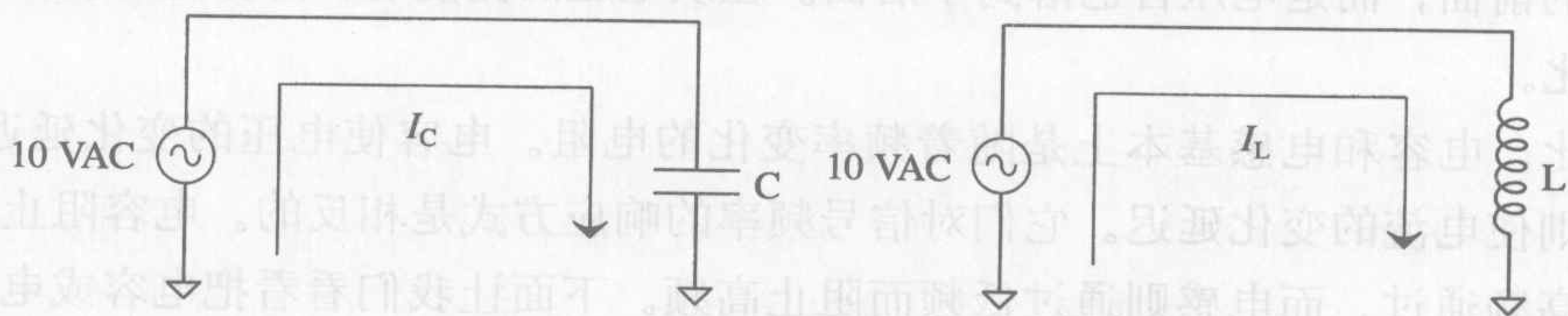


图2-30 交流电源输入电容、电感

再重复一下，频率越高，电流就越容易通过电容，但却越难通过电感。

你可能会问：“我们以前加入到RC电路中的那个阶跃输入到底是什么呢？它不是交流吗？”实际上，尽管它看起来很怪异，但它确实是交流。很久以前有一

个名叫傅里叶（Fourier）的人，他实在是精明得很，他发现在快速变化的信号后面隐藏的，是各种高频分量。他证明，信号变化越急剧，存在的高频分量就越多。对此进行深入的介绍超出了本书的范围，所以就让我们这样来说吧：前面讨论过的阶跃输入有一个很尖的方角，其中隐藏着一大堆的高频分量。这些高频分量可以通过电容，因此（电压）方角就（随高频电流）跑掉了，留下的特征曲线就是我们看到的RC电路的瞬态响应。

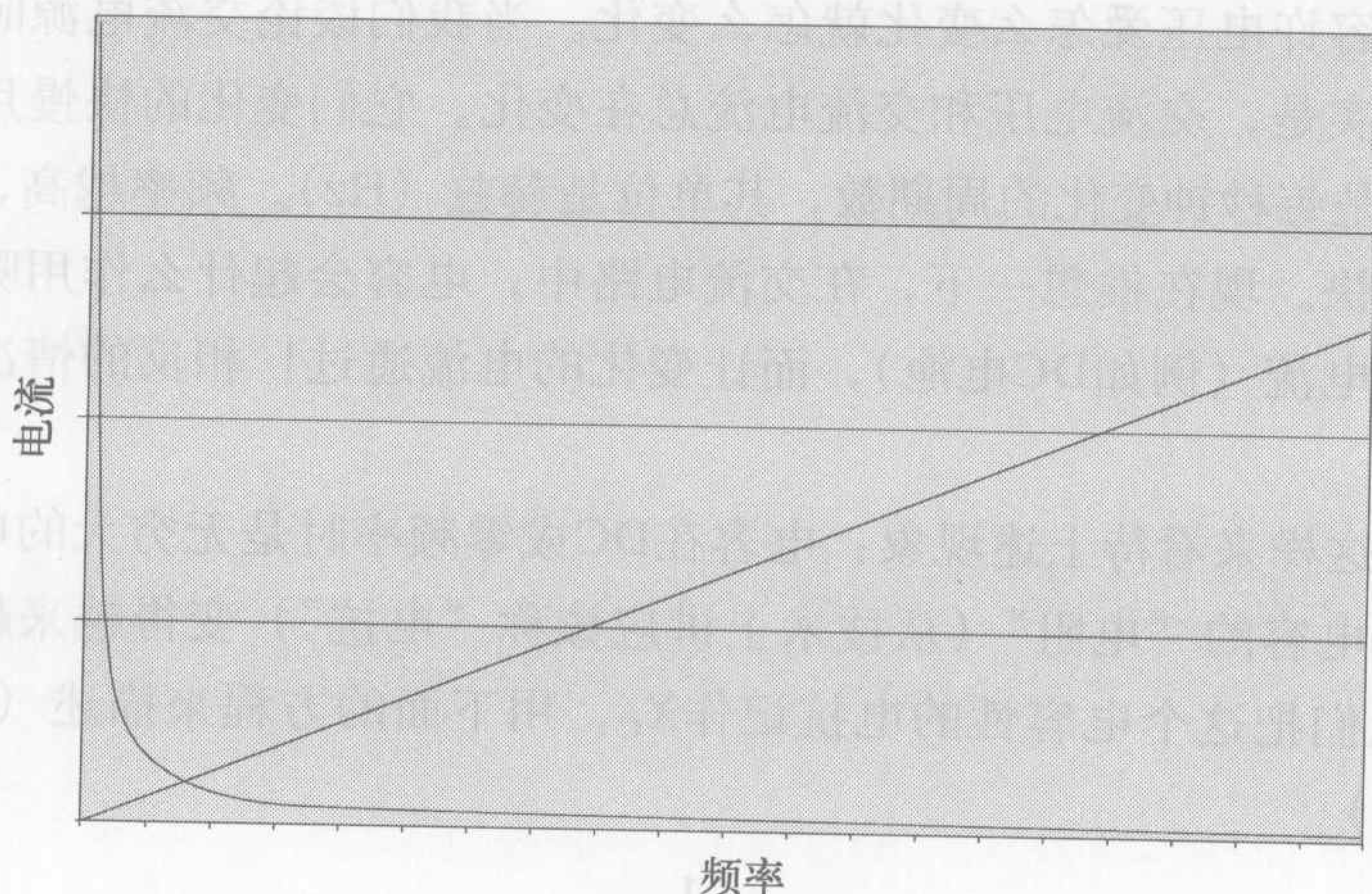


图2-31 电容、电感的电流随频率变化的曲线

在结束这两个元件的讨论之前，我要介绍一下相位移的概念。当电压和电流同步时，称它们是同相的。我已经讲过很多次了，电感阻碍电流的变化，但电压却不受阻碍，因此如果绘出电压和电流的关系，你会看到电流的变化相对电压的变化有一点不同步。我们称这种情况为滞后。电容则具有相反的效应，其电压相对电流有个延迟，电流的变化超前于电压的变化。这并不是说电流魔术般地跳到了电压的前面，而是电压自己落到了后面。但从电压的角度看，好像是电流先发生了变化。

因此，电容和电感基本上是随着频率变化的电阻。电容使电压的变化延迟，而电感则使电流的变化延迟。它们对信号频率的响应方式是相反的。电容阻止低频而让高频通过，而电感则通过低频而阻止高频。下面让我们看看把电容或电感同电阻接在一起会有什么影响。

2.2.6 低通滤波器

让我们考虑如图2-32所示的电路。

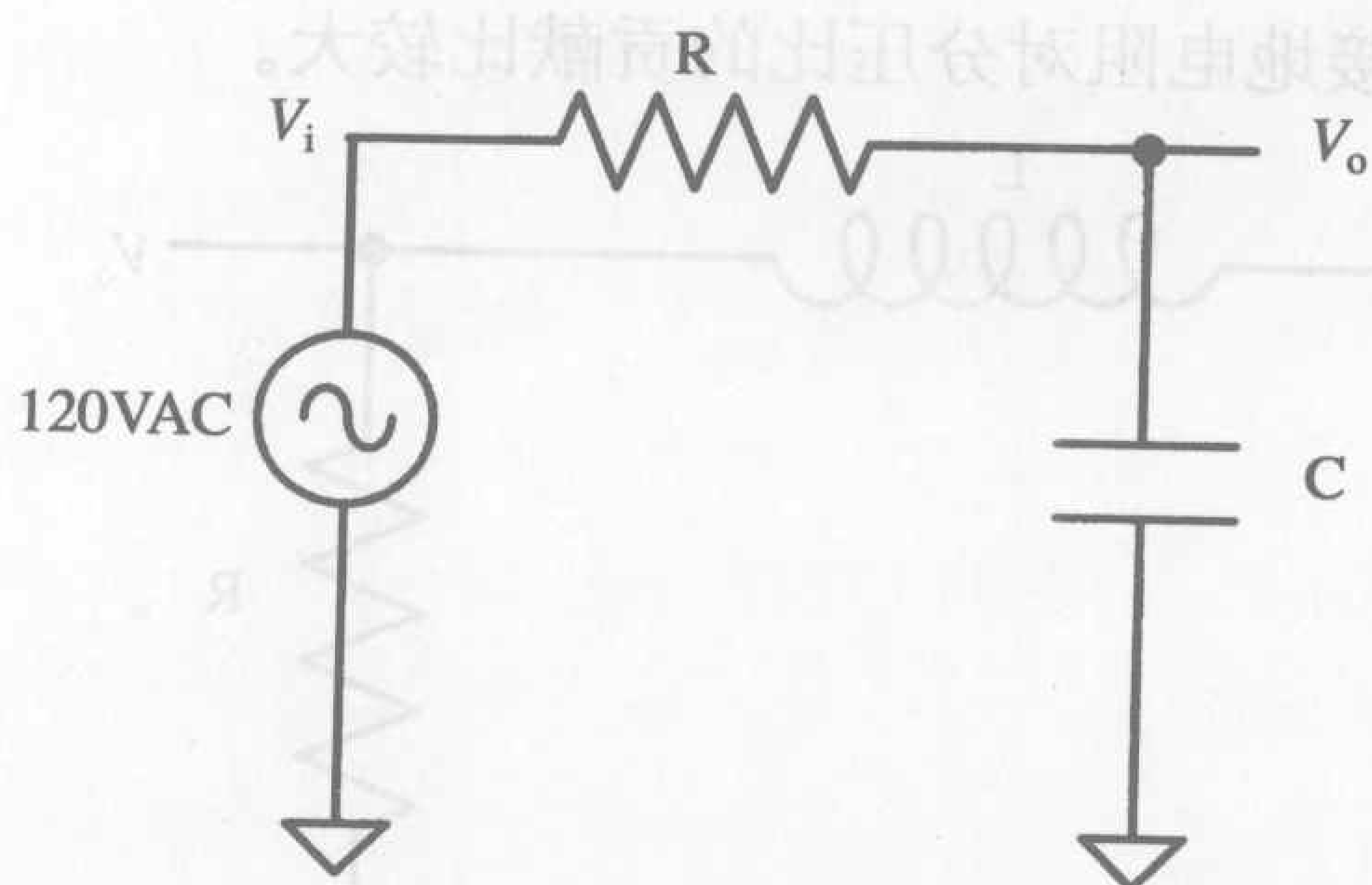


图2-32 基于电容的低通滤波器

以前为了理解电容的作用，我们曾介绍过RC电路，请注意一下图2-32的电路同RC电路的相似性。可以看出，二者的差别在于，现在施加的是一个交流信号，而不再是以前的阶跃输入了。

这个电路称为低通滤波器。它的分析不难，只要你真正理解了分压原理以及电容是如何对频率作出反应的就可以了。

如果它是一个简单的分压器，那你只需根据电阻的比值，就可以求出将有多大的电压会出现在输出上。请记住电容是一个依赖频率的"电阻"，并且努力推想当频率从零变化到无穷大时，会出现什么样的结果。

在低频下，电容上通过的电流不大，所以信号没受到什么影响。随着频率的升高，电容中通过的电流越来越大，慢慢把输出电阻短接到地，使分得的输出电压越来越小。有一个魔术般的频率点，其时的输出电压等于输入电压的一半[①]。这发生在频率等于$1/RC$的时候。你也许注意到了，这个频率等于我们早前（介绍电容时）用到的时间常数的倒数。这两个量碰到了一起，你说酷不酷、巧不巧？

这个电路之所以称为低通滤波器，是因为它让低频通过，而降低或衰减高频。

你也可以利用电感和电阻做出一个低通滤波器来。已经知道电感的行为跟电容相反，你能想象出这个电路应该是什么样子吗？答案如图2-33所示。

不错，我们交换了元件的位置。这是因为，电感是电容的反面，它通低频、阻高频。这个电路的功能跟低通RC电路相同，但是工作方式稍有不同。它仍然是一个分压电路，但低通RC电路是接地端的"电阻"变化，而这里是输入端的"电阻"变化。在低频下，电感相当于短路，接地电阻没有受到什么影响。随着频率的升高，电感将把电流扼断[②]，就好像分压器输入元件的电阻变得越来越大一样。

---

① 这个点也称为－3dB下降点。目前我想尽量避免使用dB，以限制需要消化的知识的数量。

② 无需任何证据，我断言电感有时被称作扼流圈的原因在于，它们会扼阻高频分量。

因此，在这个电路中，接地电阻对分压比的贡献比较大。

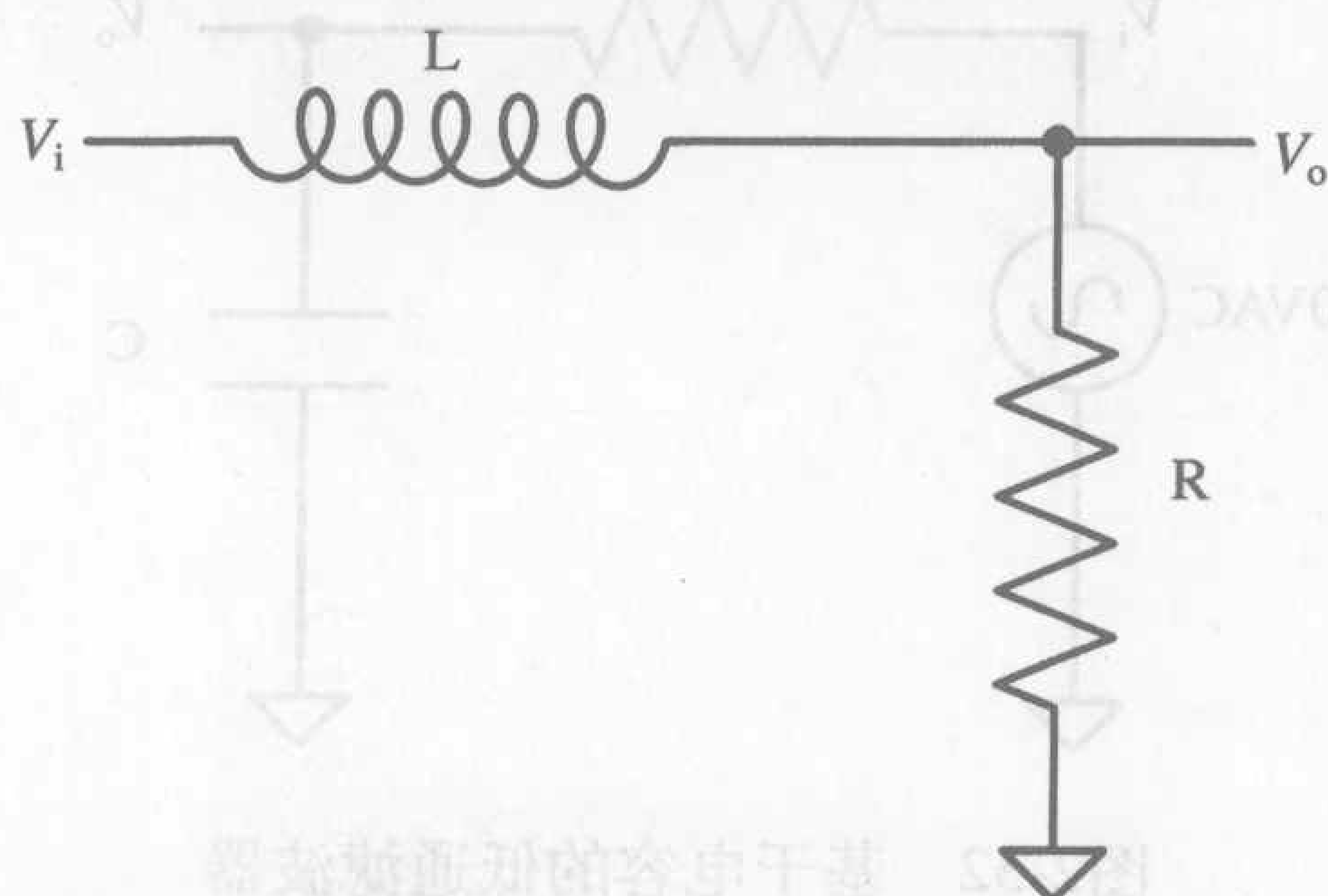


图2-33　基于电感的低通滤波器

总之，在低通滤波器中，随着频率由低到高，电容在开始的时候好似开路，然后慢慢向短路转变。而电感在开始的时候则好似短路，然后慢慢向开路转变。在分压电路中，将电容、电感这两种元件放置在相反的位置上，我们得到了同样的滤波效果。在两种结构的滤波器中，当频率升高时，分压比都会降低，因而会使输出电压降低。它们都具有通低频、阻高频的特点。现在，若把这些电路中的元件交换一下位置，你猜猜会有什么结果呢？

2.2.7　高通滤波器

在图2-32的低通滤波器中，交换电容和电阻的位置将产生出另一种电路，这就是高通滤波器。因为你现在已经拥有了极强的推理和直觉分析的能力，因此你肯定会想："我敢打赌，这个电路是通高频、阻低频的。"你说得很对，该电路如图2-34所示。

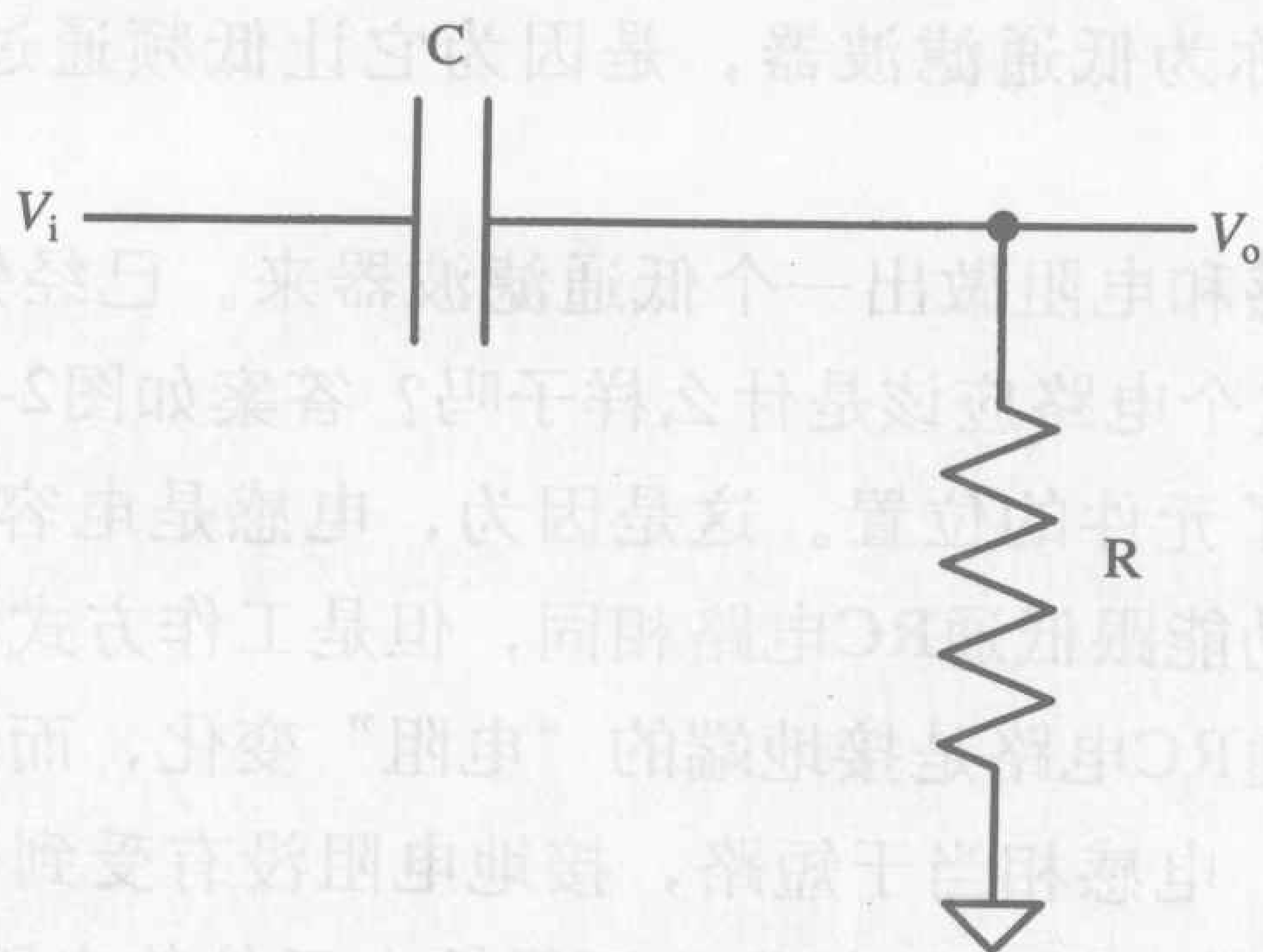


图2-34　基于电容的高通滤波器

由于已经讨论过低通滤波器，因此这个新电路的运行情况对我们来讲应该是

一目了然的。电容在低频时像大电阻，使分压器阻断输出；而在较高的频率下，电容则好似短路一样，通过更多的电流，使较高的电压送到输出。电感版本的高通滤波器电路如图2-35所示。

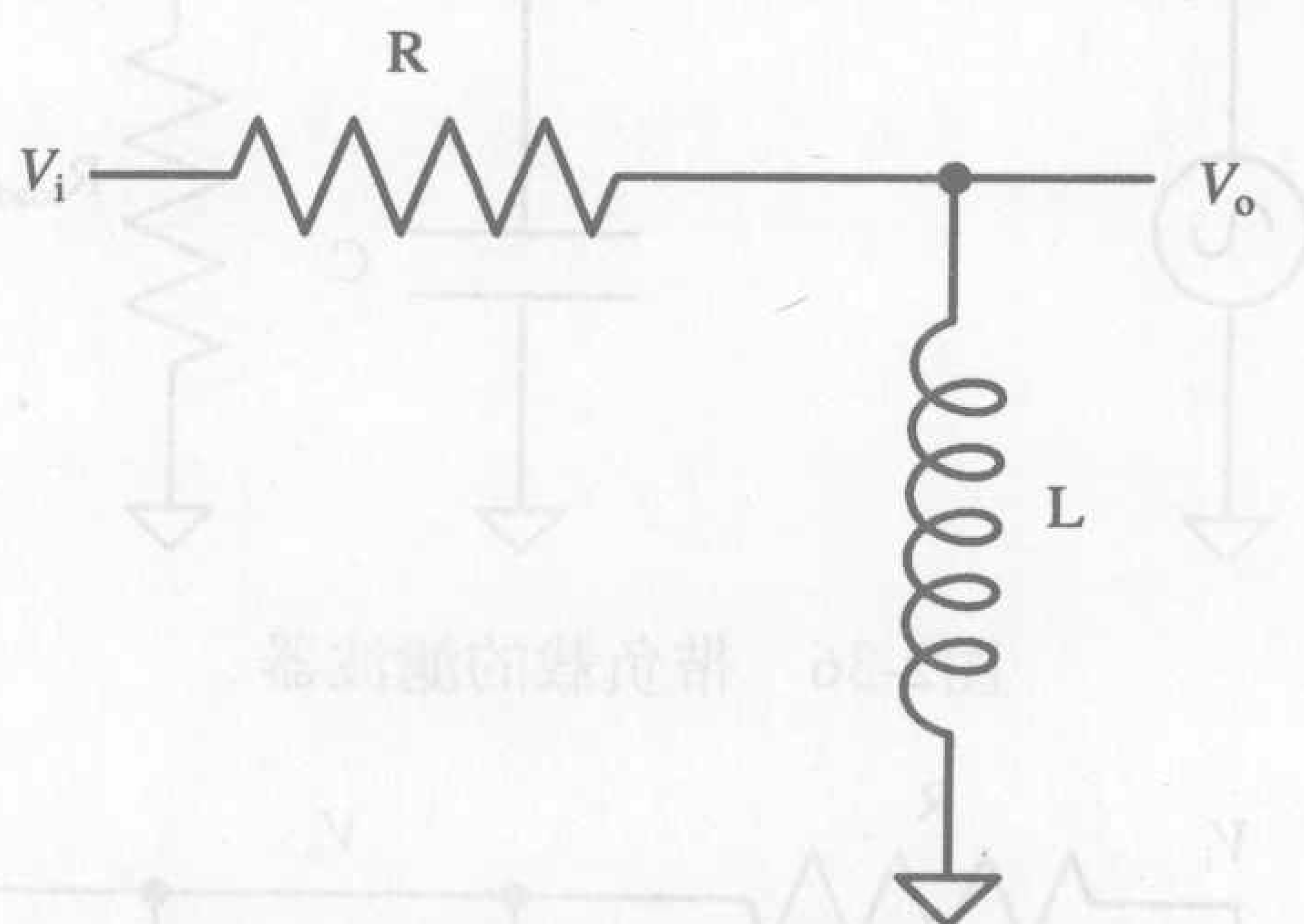


图2-35 基于电感的高通滤波器

你可能已经注意到，它就是RC高通滤波器的相反版本。还有另外一个小小的惊喜等着你，那就是其半电压输出点①是$1/\tau$，也跟RC低通滤波器相同。

总之，高通、低通滤波器都利用了电容或电感在频率响应上的特点。其具体做法是将一个电容或电感与一个电阻相配合，产生一个分压器，以将不需要的分量衰减掉，而容许所需要的分量通过。更进一步，若我们把电容、电感这两种无源元件放到一起，则会发生另外一些很酷的事情。一方面，我们可以构成带阻滤波器和带通滤波器，其中前者是把特定频率波段的分量除掉，后者则可以让特定波段的分量通过而阻断所有其余的分量。另一方面，一个电容和一个电感还可以组合成储能电路，其中会发生谐振现象。这就像1.2节中介绍的弹簧－质量系统的例子一样，储能电路将使电流从一个元件到另一个元件地来回振荡。

2.2.8 有源滤波器

前面研究的都是无源滤波器。无源元件就是没有从外部进行专门供电的元件。作为无源元件，它们会受到所谓的负载效应的困扰。这意味着，我们接到输出端的任何器件都会影响滤波器的性能。以RC低通滤波器为例，若接一个电阻到其输出端，则变成了如图2-36所示的情况。

在图2-36中，输出端的这个电阻就是负载。它将成为电路的一部分，但这还不是关键，关键是它也是一个连接到地的电阻。这将对RC滤波器的性能产生什么样的影响呢？为了弄清楚这一点，让我们对电路做戴维南简化。先把交流电压源短路，

① 这个点也称截止点或3dB下降点。

就跟直流电压源的处理方法相同，因此电路变成了下面的样子（如图2-37所示）。

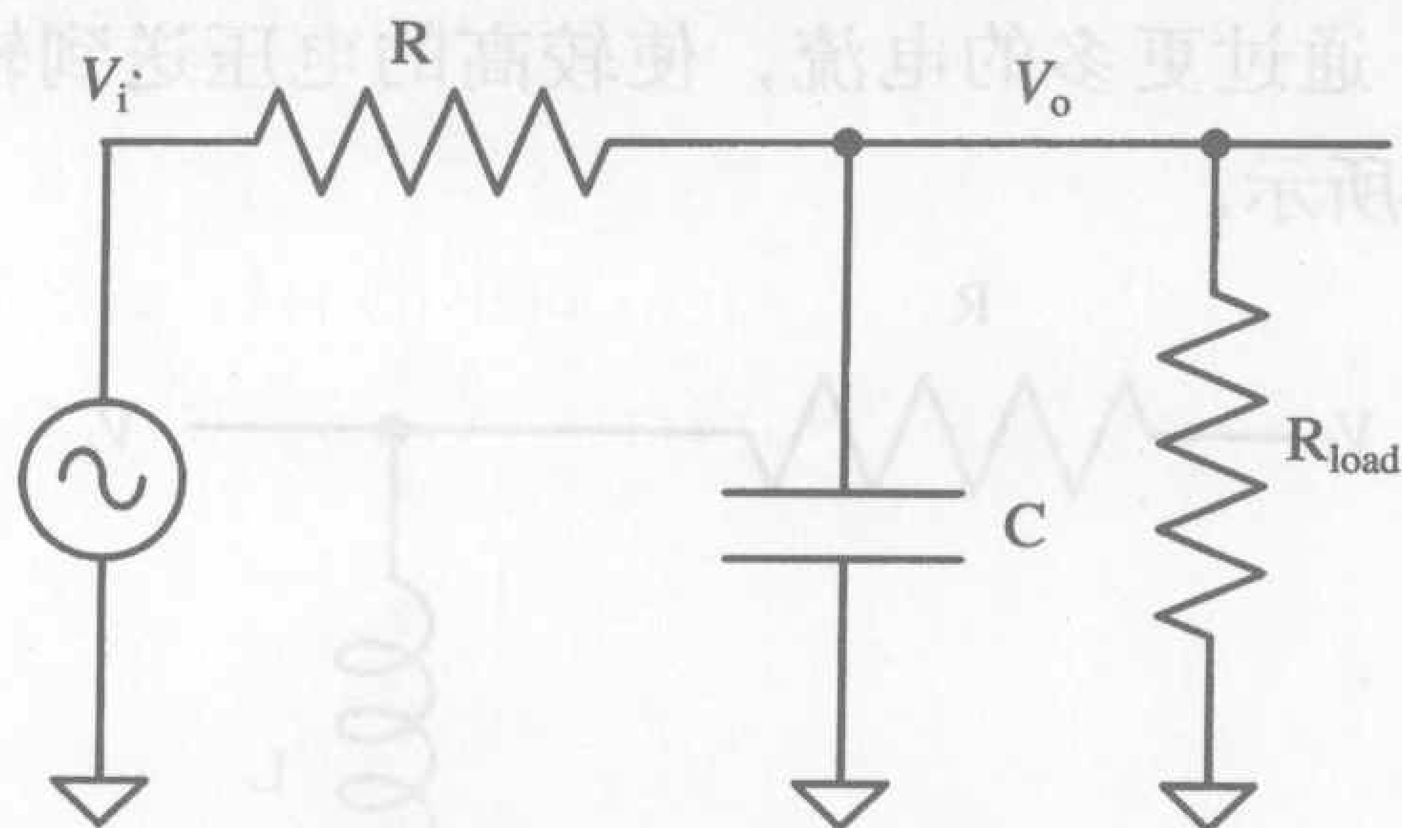


图2-36　带负载的滤波器

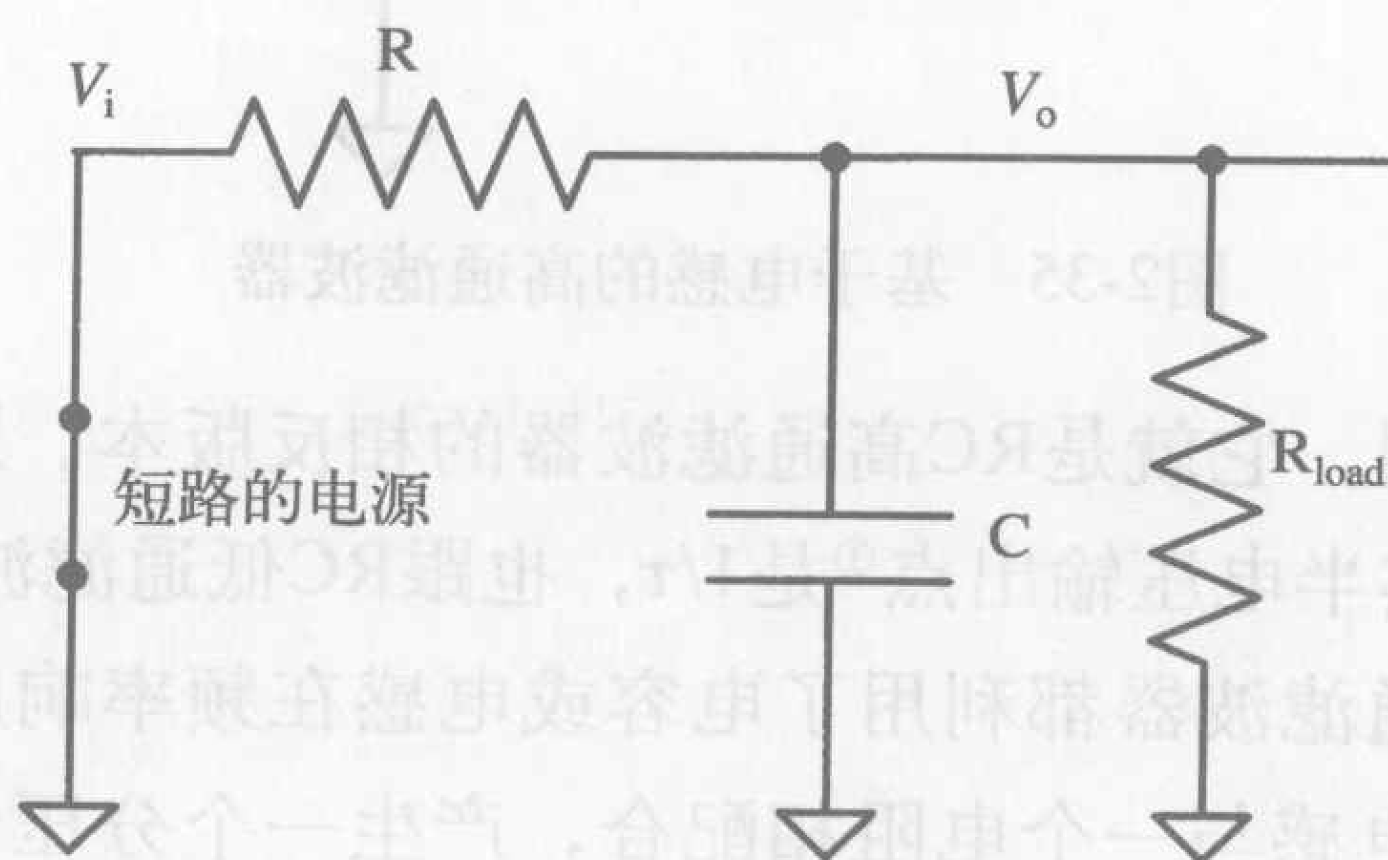


图2-37　戴维南简化后的电路表明了负载的影响

因为我喜欢在例子中使用实际参数，让我们来拼凑几个数据。取$R=10\text{k}\Omega$，$R_{load}=10\text{k}\Omega$，$C=0.1\mu\text{F}$。

在我们做戴维南简化时，在可能的情况下，我们应尽可能将所有的元件简化成一个元件。在这个例子中，两个电阻是并联的关系，对它们应用并联法则可以得到5kΩ。可见，由于负载的加入，*R*值已经发生了显著的变化！

这个滤波电路有个特点似乎违反我们的第一直觉，就是它的时间常数是由我们刚刚得到的戴维南简化电路的R决定的。在无负载的时候，τ为$10\text{k}\Omega\times0.1\mu\text{F}$或1ms，而加上负载后，$\tau$为0.5ms，只有前面的一半！由于该滤波器的输出取决于τ，因此可以看出负载已经对它产生了显著的影响。

避免以上问题的一个方法，就是在设计时增加一个有源元件，使该滤波器成为一个有源滤波器，如图2-38所示。增加这个有源元件是出于这样一种想法，即把负载的影响减到最小，以便我们可以得到一个较好的、可以预测的响应。有源滤波器的输出具有这么一个特点，即不管你加什么样的负载，都不会对滤波器的响应产生影响。

有源器件的输入具有非常高的阻抗。在本例中，它相当于一个10MΩ的电阻。

将其加在RC滤波器上，只要它远大于电路中的R值，就不会对电路的时间常数产生什么影响。在图2-38的电路中，我们看到的缓冲器就是有源器件，其输出电压将跟输入电压保持一致。它将对信号进行缓冲，不管你在输出上挂什么负载，滤波器都不会受到影响。尽管这里介绍的只是最简单的有源滤波器之一，但各种有源滤波器的原理都是一样的——都是用一个有源元件来保持或增强滤波器的准确性。

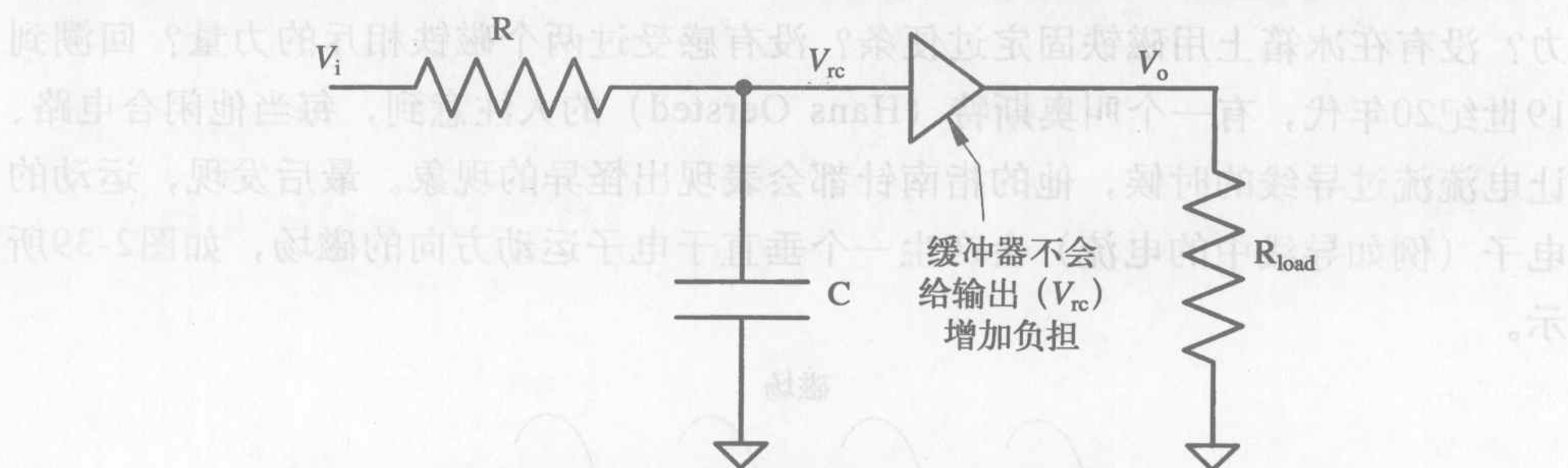


图2-38 有源缓冲消除负载的影响

经验法则

- 电子从负极往正极移动。
- 直流电流只往一个方向流，其频率为零。
- 交流电流周期性地改变流动的方向。
- 直流中的频率分量为零。
- 当与电阻配合时，电感或电容都可以构成低通滤波器和高通滤波器。
- 电感和电容放在同一个电路时，将发生振荡。
- 有源滤波器通过加入有源器件，以保持或增强滤波器的准确性。

2.3 磁场与电场

电子无处不在，更确切地说，电子的影响随处可见。在我们的周围，存在着由这些讨厌的小精灵引起的各种不可见的力场。这些场的存在为我们进行深入讨论提供了正当的理由，因为它们是我们解决电气问题的考虑因素之一。这些场能够储存能量，并以各种方式影响它周围的世界。因此，我们最好对这些场以及它们如何互相作用建立一个详细的知识体系。

不错，我们还不能像《星际旅行》中那样把人在行星之间发射来发射去[①]，但

① 注意我说的是发射人。物理学家已经实现了将一个量子位从一点"发射"到另外一点。有人说在数年之内，就能实现遥传（teleporting）一个原子的目标。

是物理世界中确实存在着一些不可见的场，我们在电路中看到的各种效应就是由它们产生的。理解这些场将帮助我们培养起工作所需的直觉能力。

2.3.1　磁场

在我们将要讨论的两种场中，磁场最为人所熟知。有谁没有体验过磁铁的力？没有在冰箱上用磁铁固定过便条？没有感受过两个磁铁相斥的力量？回溯到19世纪20年代，有一个叫奥斯特（Hans Oersted）的人注意到，每当他闭合电路、让电流流过导线的时候，他的指南针都会表现出怪异的现象。最后发现，运动的电子（例如导线中的电流）会产生一个垂直于电子运动方向的磁场，如图2-39所示。

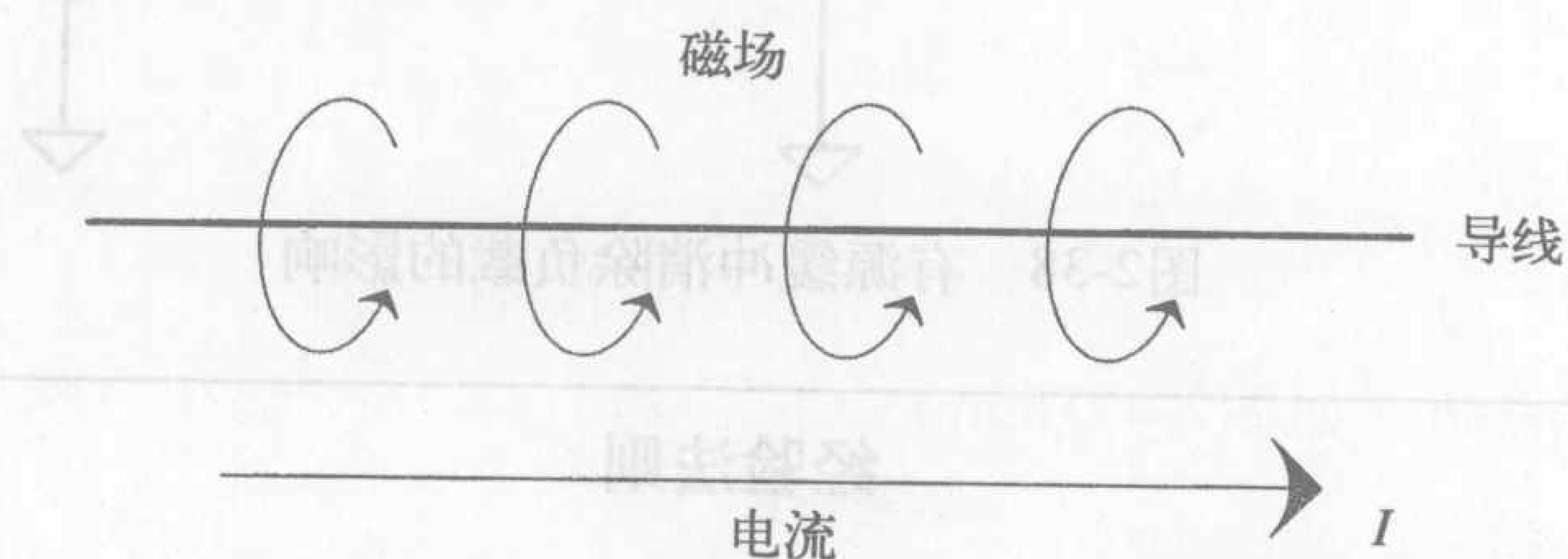


图2-39　由导线中电流产生的磁场

这个磁场同永久磁铁周围的磁场是同一种场。事实上，如果你像下面这样缠绕导线（图2-40），那么磁力线将对齐并彼此加强，效果将更接近永久磁铁。

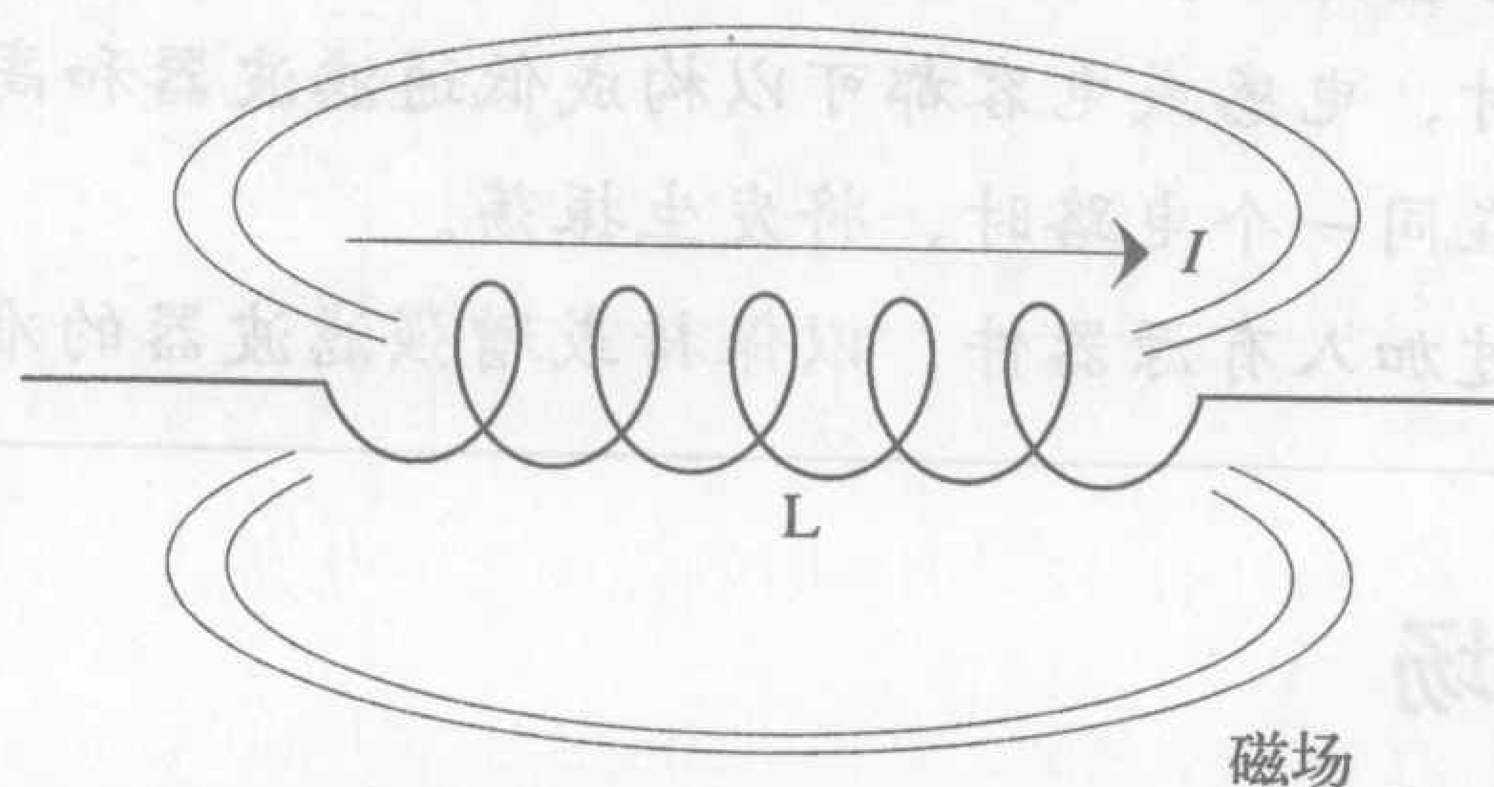


图2-40　缠绕导线会改变磁场的方向并使其加强

这就是**电磁铁**！它们是很酷的零件，因为我们可以使其开通，也可以使其断开，不像永久磁铁。另一个重要的事实是，不仅导线中通过电流的时候会产生磁场，反过来，变化的磁场也可以产生电流。导线绕成的线圈之所以被称为电感，就是因为这个原因。当你给电感施加电流时，能量被作为磁场储存在电感中。这与橡皮筋拉伸可以储存能量是一样的道理。当断开电流时，电感会反抗，随着磁场的衰落（消失之前它处于变化之中），能量将被释放出来。磁场的衰落将在（闭

合的）导线中感应一个电流。让我们考虑下面的电路（如图2-41所示）。

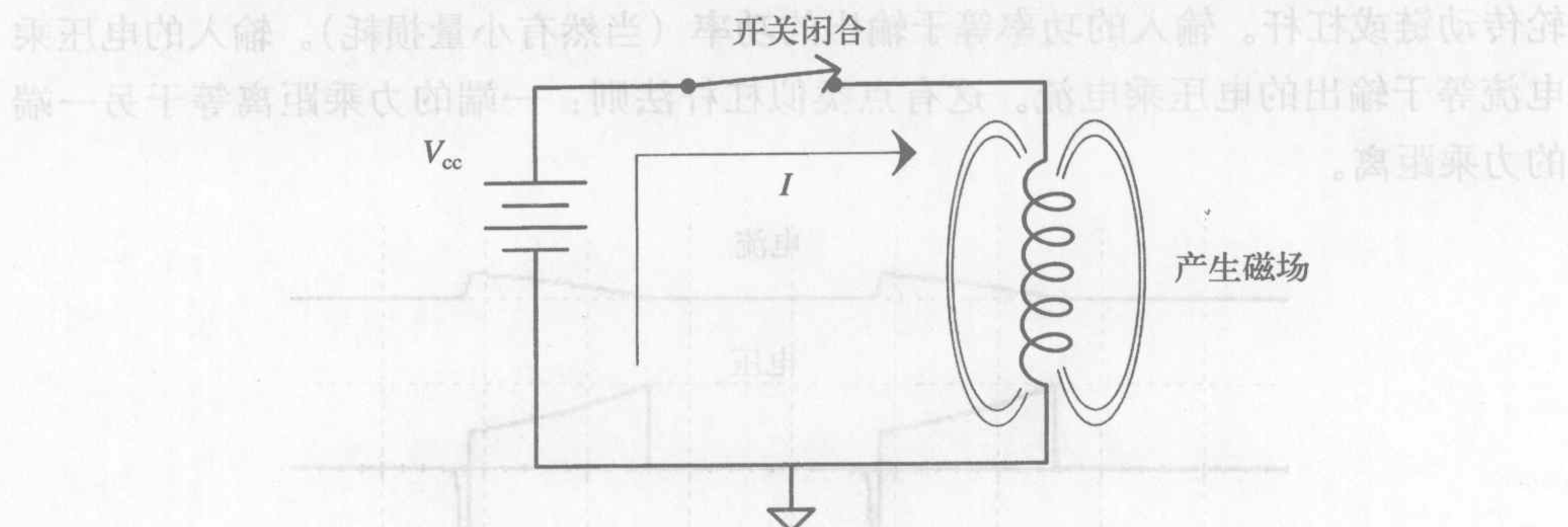


图2-41 建立中的磁场阻碍电流的变化

当开关处于闭合状态时，将有电流流过，于是磁场被建立起来。根据前面所学的知识可以得出，是磁场“建立”的这个行为，在阻碍着电感中电流的变化。反过来也一样，如果我们断开开关，则磁场消失时的磁场变化，将试图维持电流在电感中继续流动（如图2-42所示）。

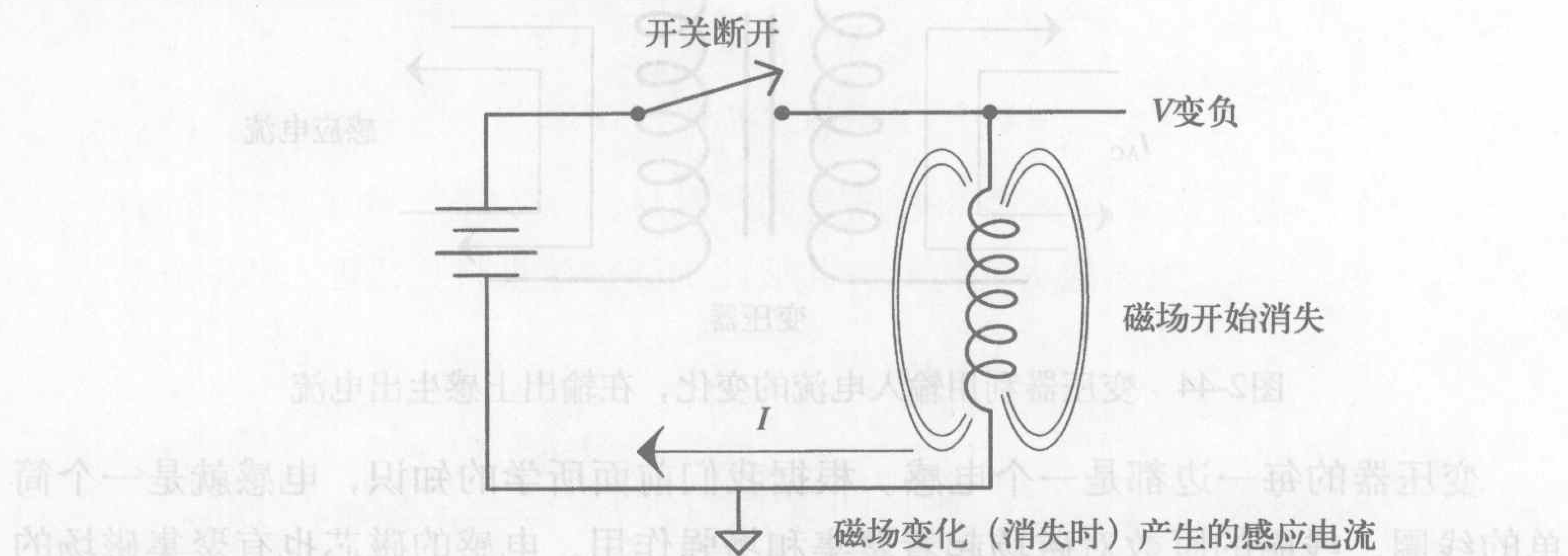


图2-42 消失时的磁场产生电流

如果电流没有地方可去，那么电感上的电压将瞬间增高，然后在感应电流随着磁场下降而下降时快速消失。看看下面这个图（如图2-43所示），从其中可以看到开关断开和闭合以后，电感中的电流和电压变化的情况。

以上介绍的实际上就是电磁感应现象，它也是变压器工作的基础。当变压器的一侧绕组建立磁场时，将在另一侧绕组中感应出一个电流。当磁场降低并且改变方向时，将在输出上感应出一个对应的电流，如图2-44所示。

变压器每边的匝数比（也称变比）控制着从输入到输出的电压比值。对于一个10：1的变比，当在一边输入120V时，将在另一边产生12V。请注意，在电压得

到降低的同时，电流却被增大了。从这一点来看，变压器有点类似机械世界的齿轮传动链或杠杆。输入的功率等于输出的功率（当然有小量损耗）。输入的电压乘电流等于输出的电压乘电流。这有点类似杠杆法则：一端的力乘距离等于另一端的力乘距离。

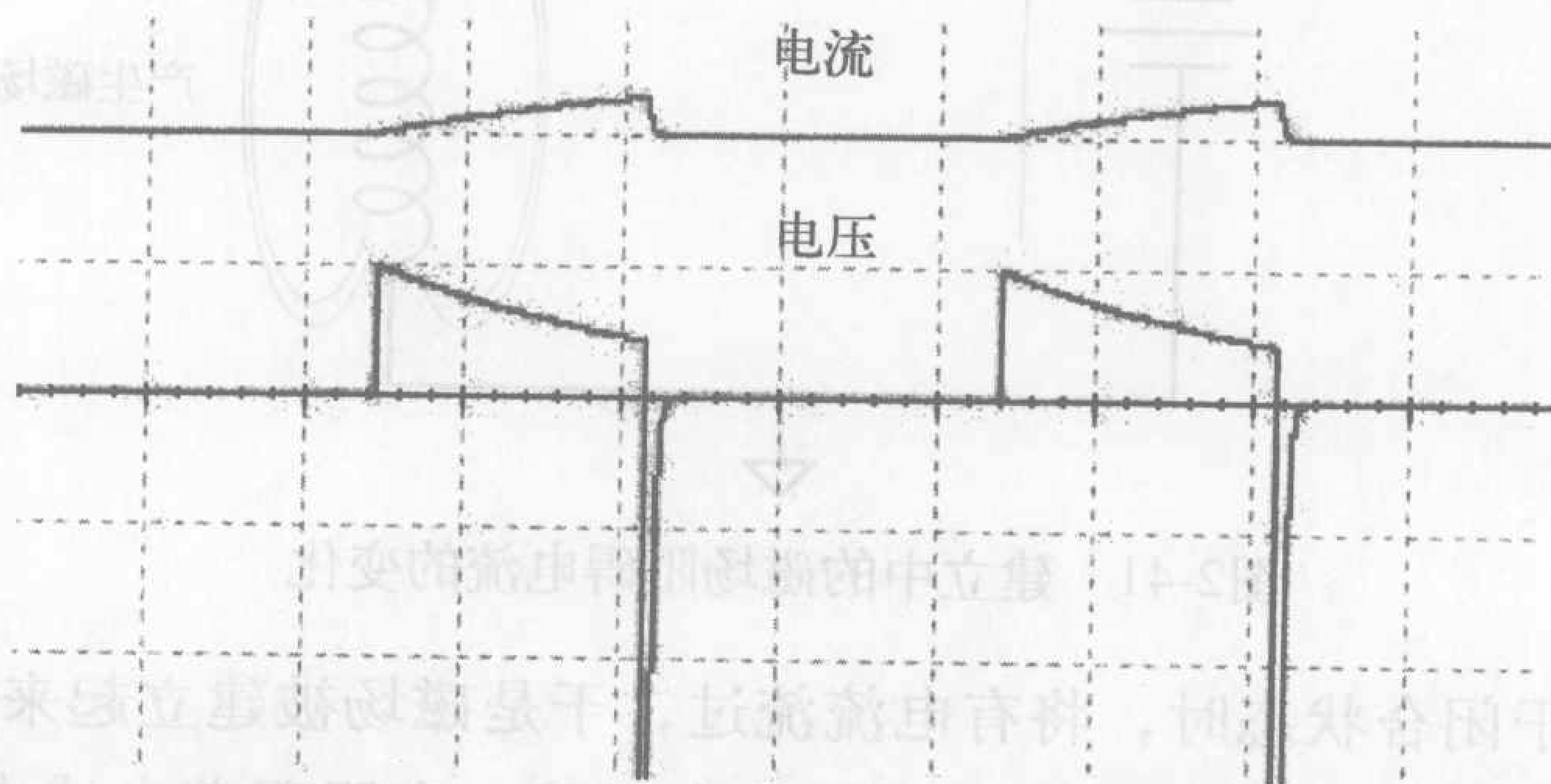


图2-43　当电感切入和切出电路时电压和电流的变化

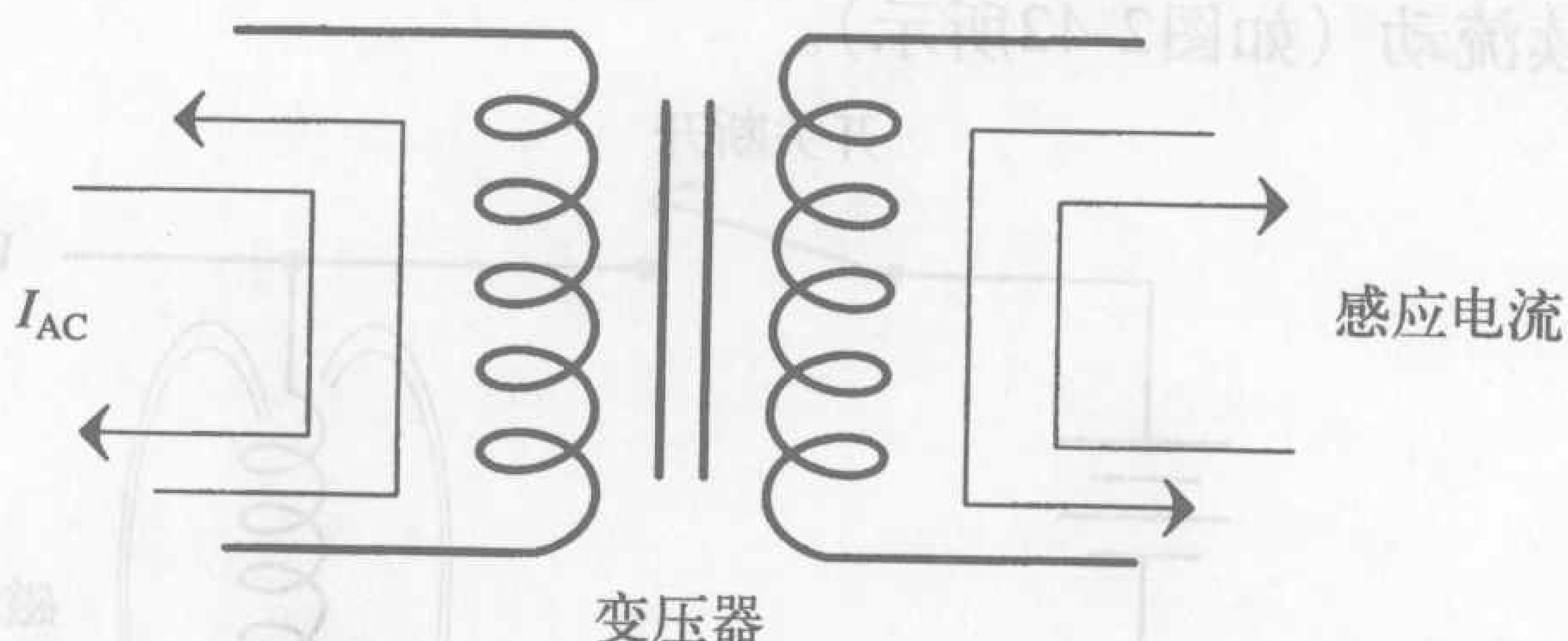


图2-44　变压器利用输入电流的变化，在输出上感生出电流

变压器的每一边都是一个电感。根据我们前面所学的知识，电感就是一个简单的线圈。线圈的匝数对磁场起着聚集和增强作用。电感的磁芯也有聚集磁场的作用。磁芯材料会产生饱和现象，饱和以后，它就不能再将磁场聚集得像饱和前那样紧、那样多了。

总之，要记住的一个要点，即电流产生磁场，变化的磁场产生电流。变化的磁场可以是从外部施加的，例如一个运动的磁铁、变压器的输入端等，也可以来自（电流自身产生的）磁场的消失。电流和磁场是紧密相连的。

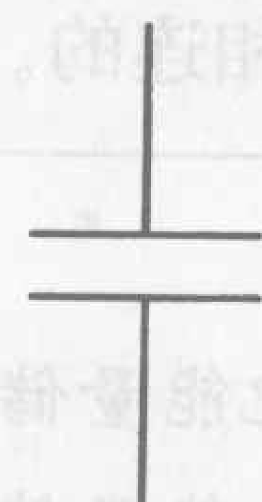
2.3.2 电场

电场没有磁场那么为人熟知。电流联系着磁场，同样，电压联系着电场。这引出了一个很好记忆的经验法则：电流是有磁性的，电压是有电性的。

电场来自电荷，电荷有正也有负。类似磁铁的同极相斥、异极相吸，同种的

电荷互相排斥，异种的电荷互相吸引。任何分子或原子都可以为中性（无净电荷），也可以带正电荷或者负电荷。电荷的累积就是所谓的电压。可以这样来看待这一点：电荷就是产生电场的电压，电荷的移动叫做电流，电流产生磁场。

正如电感是聚集磁场的一种方法，电容是聚集电场的一种方法。电容是由两个积电板（或导体）中间被一种不导电的材料分隔而构成的。这种不导电的材料称为电介质。如图2-45是电容的表示符号，它模仿了电容的结构。


图2-45 电容符号

由于电介质的存在，电流不能通过电容，因此电荷都累积在电容的一侧，这有点像50辆汽车拥堵在高速公路上的样子（如图2-46所示）。

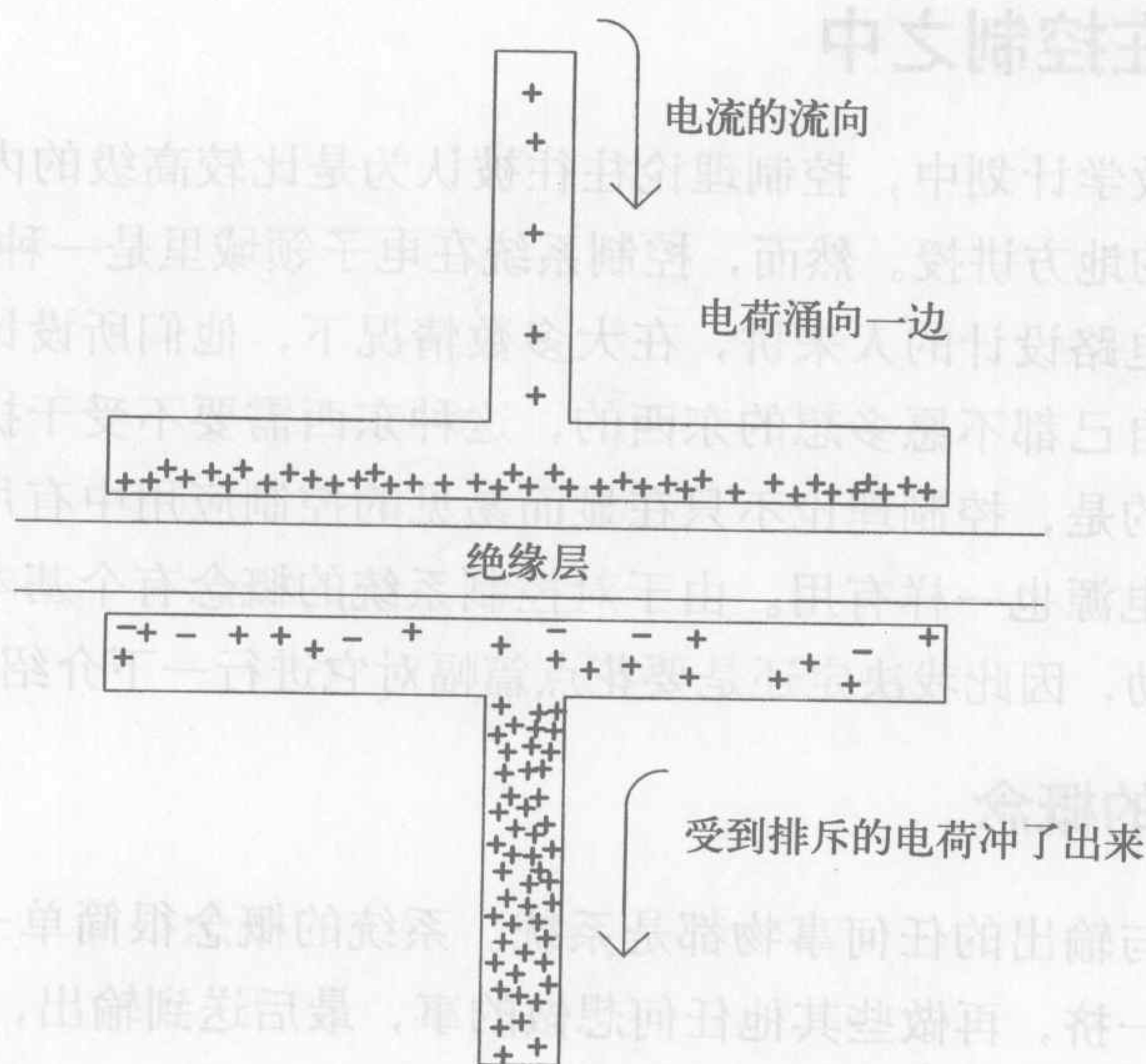


图2-46 电荷在电容中的分布

随着某种电荷在一侧堆积，电场建立起来，驱使电容另一侧的同类电荷纷纷逃离。当一切平静下来的时候，电容的两侧将拥有相同数量的异种电荷。以这种方式，电容在极板上储存起电荷，建立起电压。在确定的电场下，电容能够储存的电荷数量是极板面积的函数。电容能够建立的电压数值则依赖于电介质的强度。如果超过了绝缘的承受能力，那么电介质将被击穿，电荷将跨过极板间的间隙。在雷雨天气里也会发生同样的事情，雷电将在云层和大地之间累积，就跟在电容的两个极板上发生的一样。雷击是电容中发生的绝缘（或者说电介质）击穿现象

的大规模版本。

总之，电流产生磁场，电压产生电场。磁场能够储存能量，电场也能储存能量。当磁场消失时，它试图留住电流；当电场消失时，它试图留住电压。电压和电场是紧密相连的。

经验法则

- 电感把能量储存在磁场中。
- 电容把能量储存在电场中。
- 电流是有磁性的。
- 电压是有电性的。

2.4 保持在控制之中

在大多数教学计划中，控制理论往往被认为是比较高级的内容，因而被特意放在比较靠后的地方讲授。然而，控制系统在电子领域里是一种十分常见的应用。例如，对于搞电路设计的人来讲，在大多数情况下，他们所设计的设备都是用来控制某样他们自己都不愿多想的东西的，这种东西需要不受干扰地自动地完成其任务。更重要的是，控制理论不只在显而易见的控制应用中有用，它对于我们理解运放、设计电源也一样有用。由于对控制系统的概念有个基本的了解，将对许多方面都有帮助，因此我决定还是要花点篇幅对它进行一下介绍。

2.4.1 系统的概念

拥有输入与输出的任何事物都是系统。系统的概念很简单——接收输入，然后摇一摇、挤一挤，再做些其他任何想做的事，最后送到输出，这就是一个系统。它可以用方块图来表示，如图2-47所示。

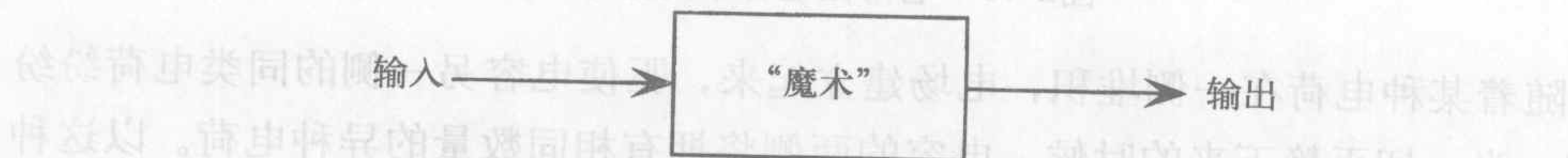


图2-47 系统中的“魔盒”

所有的魔术都发生在这个盒子里面。这个“魔术”称作传递函数。传递函数等于输出比上输入。它就是你对输入进行处理并得到输出的那个方程，所以满足下面的公式

$$输出 = “魔术” \times 输入 \qquad (2\text{-}16)$$

经过少许代数运算得到：

$$\frac{输出}{输入}=“魔术” \tag{2-17}$$

现在你已经知道如何找到盒子中的那个“魔术”了，事情就是这么简单！下面让我们来看个例子。你往某个“魔盒”中输入12mile（1mile＝1.61km），然后等待着，结果蹦出了19.32km。你可能已经猜到，这个盒子中的“魔术”是将英里转换成千米，但其传递函数是多少呢？根据上面的方程，我们只需将输出除以输入即可。因此有

$$\frac{19.32\,\text{km}}{12\,\text{mile}}=1.61\frac{\text{km}}{\text{mile}} \tag{2-18}$$

在我们这个实现转换的“魔盒”中进行的“魔术”是这个样子的，如图2-48所示。

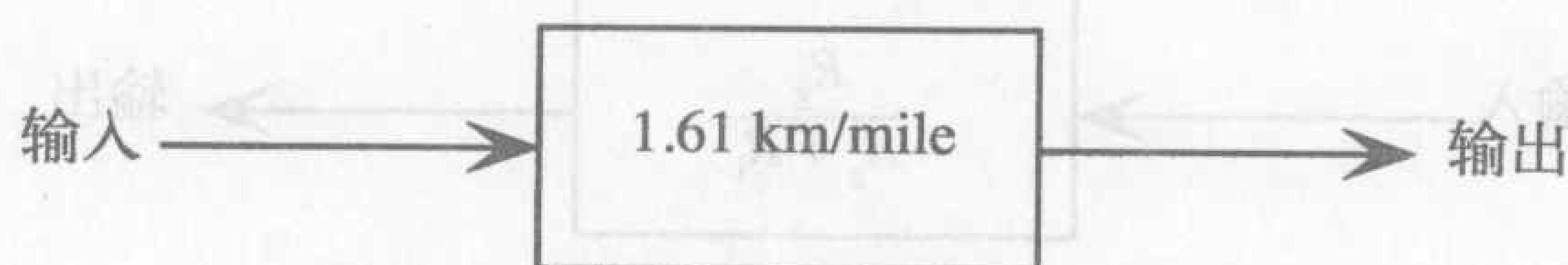


图2-48 公开了的“魔术”

请注意写在盒子里面的单位。这可以帮助我们辨别输入用的是什么单位，得到的输出将是什么单位。在你的脑袋里一定有一个小声音在说：“这不就是在重复单位代数那一节吗？”是的！但在这里我们介绍的是一个更为正规的概念，其中包含了一些很优雅的表示方法，譬如你画的那个很酷的小盒子，它可以帮助你理解系统。你会问的下一个问题一定是：“怎么把它用到电子学里去呢？”好吧，我告诉你，从最基本的电路到最复杂的电路，你都可以将其用某一个这样的“魔盒”来表示（有些教材称“魔盒”为黑盒子（black box））。下面再举个例子。以电阻为例，电阻可以看成是电流到电压的变换器。输入电流，施展魔术，在输出上得到的是电压。其传递函数是什么呢？如果在你的喃喃自语中包含了“欧姆定律”这几个字，那你就是对的。欧姆定律的公式是

$$R=\frac{V}{I} \tag{2-19}$$

因此，表示电阻功能的方块图（魔盒）大致是下面的样子（如图2-49所示）。

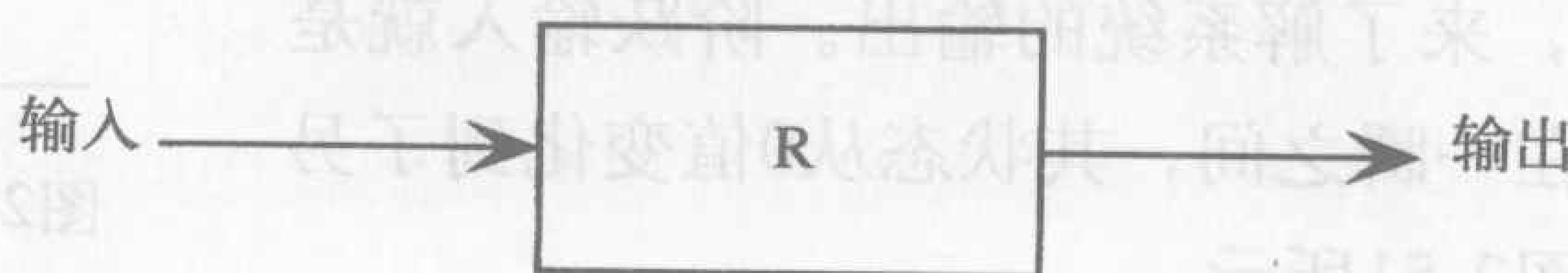


图2-49 电阻的系统方块图

不知你猜到了没有，在这个传递函数中，R是单位为欧姆的电阻值（注意：1Ω等于1V除以1A，前面介绍欧姆定律时也是这么说的）。

现在让我们把这种思想用到稍微复杂一点的器件上，譬如应用到一个分压器上。我们已经知道分压器的方程是

$$V_o = V_i \frac{R_g}{R_g + R_i} \tag{2-20}$$

你还记得V_o代表什么，V_i代表什么吗？它们是输出的电压和输入的电压！因此，只需要用一点点代数运算就可以得到其传递函数。传递函数等于输出比上输入，即

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_g}{R_g + R_i} \tag{2-21}$$

其方块图如图2-50所示。

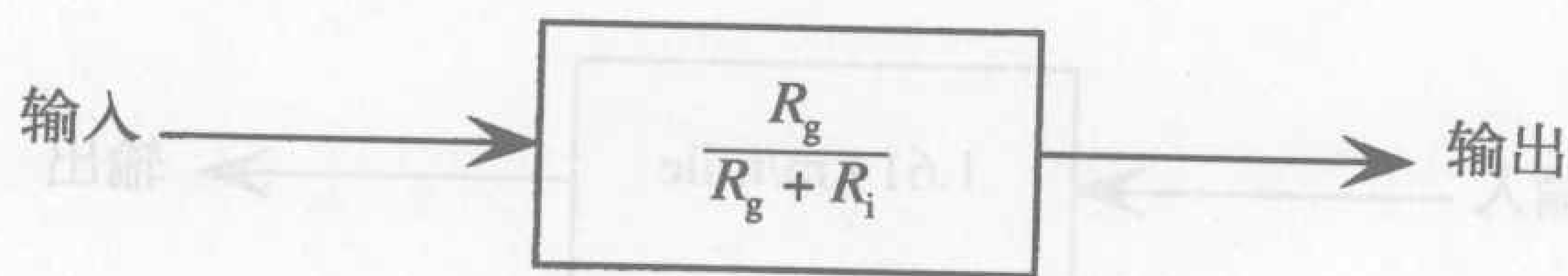


图2-50 分压器的系统方块图

我们可以用同样的概念来描述我们迄今学过的所有电路。你也许看到过这样的方块图，其中在C和L的后面跟着一个小“s”。这是一种称作拉普拉斯变换的数学技巧。它用来简化问题（微分方程）的求解。如果你用拉普拉斯变换把关于时间的微分方程进行变换，你就可以用简单的代数运算来处理变换后的方程，在处理完之后，再反变换回（时间域）去。拉氏变换超出了本书的范围，不过我要强调，当方程变得很复杂时，利用这个“s”可以把电容或电感的所有频率响应都“卷”在一起，从而进入一个很容易处理的新天地（即频域中）。

我们可以将任何系统描述为一个具有输入和输出的“魔盒”。确定“魔盒”中到底是什么的一个方法，就是将一个已知的信号加到输入上。让我们思考一下，可以加到“魔盒”输入端的最重要的激励源可能是什么呢？

2.4.2 阶跃输入

阶跃输入方法背后的思想在于，通过观测系统对一个给定输入的响应，来了解系统的输出。阶跃输入就是状态的瞬时改变，在一瞬之间，其状态从0值变化到了另一个给定的值。如图2-51所示。

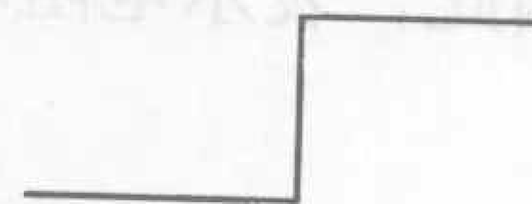


图2-51 阶跃输入

相应的输出将按照某种方式变化，（人们希望）可以用方程来预测这种变化。

这个输出就是所谓的响应。你对各种元件在阶跃输入下的响应了解得越好，你就越能更好地应用直觉信号分析能力。

让我们再来复习一下RC电路，在前面我们学过它的输出电压方程是

$$V_o = V_i\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \tag{2-22}$$

为了将其转换成“魔盒”中的传递函数，我们所需要做的就是将V_i移到等号的另一边去

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \tag{2-23}$$

现在我们将其放入盒子中。当我们把阶跃输入放在左边时，我们就会在输出上得到我们熟悉的RC电压响应曲线（如图2-52所示）。

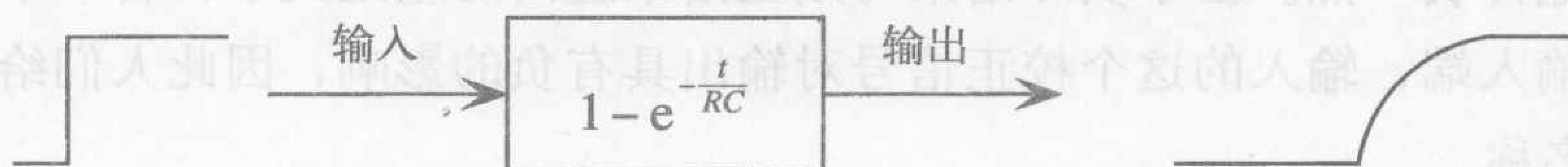


图2-52 阶跃输入加到RC电路的“魔盒”上

以上我们采用不同的方法（系统的方法），得到了相同的结论，这是一件好事。不过，只有当我们引入反馈回路的时候，系统的概念才能展现出其完整的面目。

2.4.3 反馈

控制理论的一个最优雅的应用是实现反馈。反馈就是把“魔盒”的输出作为输入的一个部分。反馈有两种类型：正反馈和负反馈。它们可以用相互作用来进行理解。

1. 正反馈

正反馈鼓励或加强一个行为，而负反馈则校正或抑制一个行为。例如，如果你儿子在足球比赛中表现很好，你鼓励他，这会激励他更加努力，这就是正反馈。正反馈会加强你所希望的行为。在上面的例子中，就是激励你儿子尽可能地努力。事实上，如果是在一个完美的世界的话，那他将一直努力下去，直到他为之献出一切为止。控制理论中的正反馈也会发生同样的事情。把输出反馈到正输入端，将起到使被反馈的那个输出不断增大的效果：增大了再反馈，反馈了又增大，如此反复下去，直到输出能够多高就有多高。

由于正反馈增强信号，因此输出往往“粘”在极限上（即与供电电压相同）。由于这个原因，因此对正反馈容许使用的反馈量要予以特别限制，只容许其在输入上产生一个很小的改变。正反馈中的这种小改变可以产生出一个称作“迟滞”

的特性。

当在正反馈回路中存在滞后的时候，正反馈的加强特性将引起另一件有趣的事情发生。让我们考虑一下这个问题：如果正反馈信号延迟了一丁点将出现什么情况？若延迟时间调得正确，能做到在输出已经移动到相反方向的时候，才加上用来改变输出的反馈信号，那么恭喜你，你已经创建了一个振荡器！

尽管正反馈用来激励刚学走路的孩子十分有用，但对于电路来讲，如果你想控制其中的某个功能，那你需要的是负反馈！

2. 负反馈

负反馈是一种控制类型。让我们回到足球的比方。若你儿子把球传得太高，远高于他想传的球员的头顶，则你会要求他短传一点。而如果他传得不够远，那你会要求他传长一点。基于实际结果与期望结果之间的差距大小，将一个校正信号回送到输入端，输入的这个校正信号对输出具有负的影响，因此人们给它取了负反馈的名称。

人类天生就具有处理负反馈的能力①。说不定你在今天早晨驾车上班的路上，就已经体验过它。如果你的车在公路上太靠近车道的边沿，你就会进行一点负反馈，产生一个校正信号，将车子带回到车道的中央。如果你不这样做的话，你可能就只能坐在牵引车的乘客座位上阅读我的这段话了，因为你的小车肯定毁坏了，正被拖着回家呢！

负反馈常用来实现可控的放大器和滤波器。

我们将在稍后对负反馈、正反馈以及它们实现运放的原理作更详细的介绍。

3. 开环增益和闭环增益

当把反馈信号从“反馈回路”中割断的时候，系统的增益就称为开环增益。这同闭环增益，或者说同反馈起作用时的系统增益是根本不同的。

采用高的开环增益，再配上负反馈，将使放大器和滤波器电路的误差达到最小。

经验法则

- 把每样器件都集总在一个“魔盒”里。
- 增益或者说“魔术”等于输出比上输入。
- 在系统中加入反馈环可以产生不同的结果。
- 正反馈会引起闭锁或使输出到达极限。

① 当然，它也有可能来自人们的某种重大经历。这种情况下，我们有可能会出现严重的系统性乖僻。

- 延后的正反馈可以产生振荡。
- 负反馈信号具有校正的特性。
- 负反馈产生可控制的输出。
- 当反馈断开时，从输入到输出的系统增益称为开环增益。
- 反馈起作用时的系统增益称为闭环增益。

第3章 电气器件

电路由元件和大量的零件构成。正如我的一个朋友所说的，你对这些零件（pieces parts）如何工作了解得越好，你做出的设计就越好。

3.1 部分导电

3.1.1 半导体

有很多教材采用量子力学的原理来解释半导体工作的机制。但在本书中，我认为最好的方法就是给大家提供一个对半导体器件最基本的直觉理解。

首先，什么是半导体？这里的导体是指导电的导体。可以把半导体看成是部分导电的材料，或者看成是在导电方面仅仅“一半”良好的材料。它类似于我们刚刚学过的电阻，它能导电但不是那么容易。事实上，你让它通过的电流越多，它就变得越热，因为它阻碍电流的流通。

在继续介绍之前，有一点要强调一下。半导体器件可以分成两类：电流驱动型和电压驱动型。电流驱动型的器件要求有电流流入才能工作。电压驱动型的器件则对输入端的电压变化产生反应。到底需要多大的电流或电压则取决于具体的器件。

3.1.2 二极管

我们从二极管开始介绍。二极管是将两种类型的半导体紧压在一块构成的，这两种半导体就是N型和P型半导体，它们是用一种称作掺杂的工艺生产出来的。硅经过掺杂处理后，硅晶体中就引入了杂质，这会影响晶体的结构。掺入不同类型的杂质，将在硅中引起一些特别酷的效应，它们跟电子的流动有关。掺入某些杂质将产生N型的结构，其中有一些多余的电子悬在外面，无处可去。掺入另外一些杂质则将产生P型的结构，其中缺少了电子，也称存在空穴。因此，我们就有了一个N型半导体，它要靠电子导电，有点费力；我们还有了一种P型半导体，它要靠空穴来导电，实际上是由电子来填充空穴，也有点费力。[1]当我们把这两种类型

① 原文“不导电”不准确。——译者注

的半导体碰压到一起时，发生了一件很酷的事情：产生了一种单向的电子阀门，我们称之为二极管（如图3-1所示）。

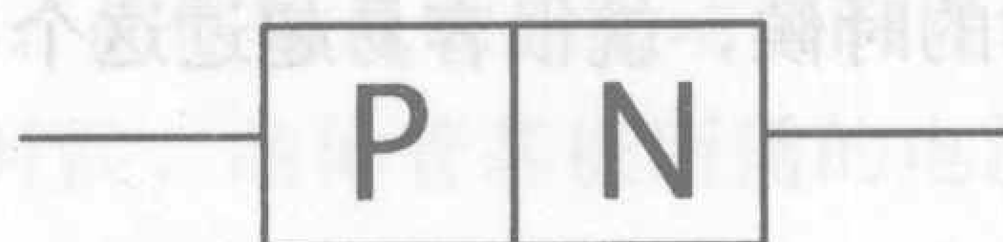


图3-1 二极管的PN结

由于空穴和自由电子的相互作用，二极管只容许一个方向（由P到N方向，即N型中的电子往P型的空穴流动）的电流。理想的二极管将在一个方向上导电而不会对信号产生任何影响。在实际中，需要考虑二极管的两个重要特性：正向压降，反向击穿电压（如图3-2所示）。

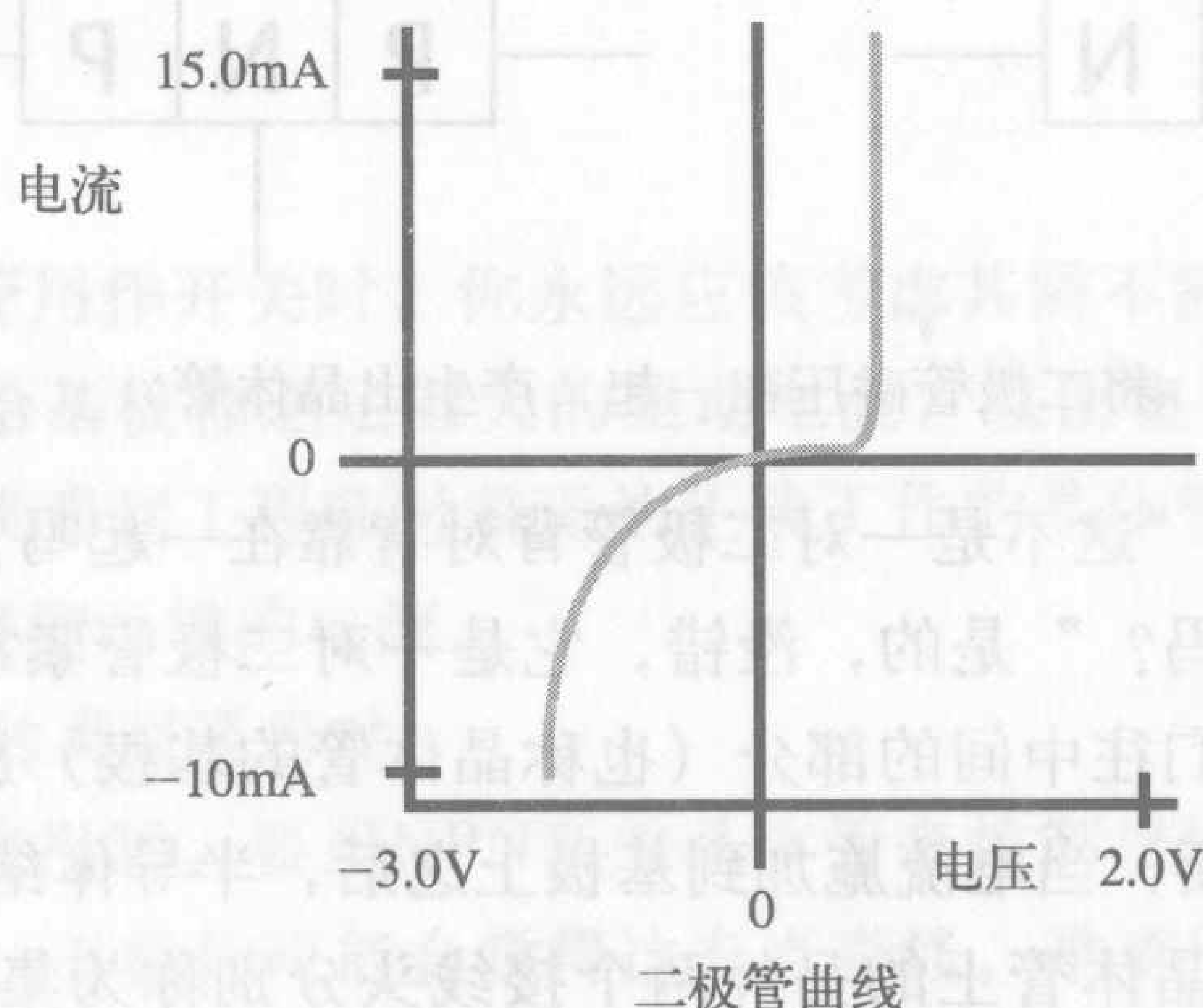


图3-2 典型的二极管电压/电流响应

1. 正向压降

正向压降是电流从正方向流过二极管时所需要的电压数值。了解这个参数十分重要，如果你想让一个小于正向压降的信号通过二极管的话，那你将很失望。二极管的另外一个常被忽视的参数是PN结上消耗的功率，它等于正向压降乘以流过二极管的电流。如果这个功率超出了二极管的额定瓦数，很快你就会看到一股烟雾冒出，二极管将被烤焦。

例如，若一个二极管的正向压降是0.7V，流过的电流是2A，则这个二极管消耗的功率是1.4W（转化成了热，就像电阻一样）。有一个重要的经验法则，就是要去核实你所选择的二极管能否承受其上消耗的功率。

2. 反向击穿电压

尽管理想的二极管可以阻断任何大小的电压，但实际情况是，就像人一样，每个二极管都有自己能够承受的电压上限。如果反向电压加得足够高，电流就会

流过二极管。发生这个现象时的电压称为击穿电压或最大反向电压①。通常这个电压是相当高的，但请注意这个电压确实是能够达到的，特别是在我们对电路中的电感或电动机进行开关操作的时候，就很容易超过这个电压。

3.1.3 晶体管

接下来要介绍的一类半导体器件是通过在二极管结构的基础上，附加一个P型或N型的半导体来构成的。这被称作双极型晶体管（bipolar junction transistor），简称晶体管或BJT。它们分成两类：NPN型和PNP型。我想你应该猜得出以下这些标记的来路（如图3-3所示）。

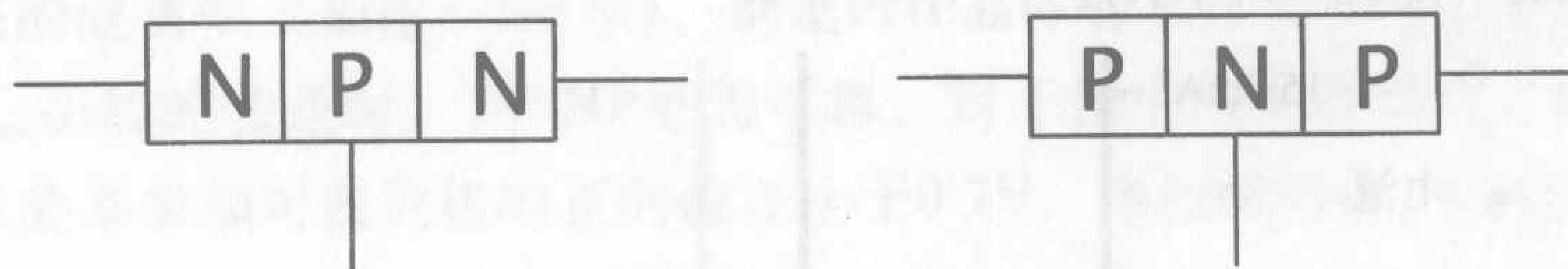


图3-3 将二极管碰压在一起，产生出晶体管

乍看一眼你也许会说："这不是一对二极管背对背靠在一起吗？这不是将阻止电流沿任何一个方向流动吗？"是的，没错，它是一对二极管紧靠在一起，它是阻止了电流的流动！在我们往中间的部分（也称晶体管的基极）施加一个电流以前，你说的都是对的。然而，当电流施加到基极上之后，半导体结就得到了供电，电流就可以流过晶体管。晶体管上的另外两个接线头分别称为集电极和发射极。NPN需要电流流入基极来开通晶体管，而PNP需要电流流出基极才能开通②。换句话就是，NPN需要基极具有比发射极更正的电压，而PNP需要基极具有比发射极更负的电压。还记得上面提到的晶体管跟二极管之间的相似性吗？它们实在太相似了，基极－发射极之间的半导体结在行为上完全就是一个二极管，我们需要克服其正向压降才能让其导通。

设计元件符号的人为我们做了件好事，晶体管符号设计得很容易理解。在发

① 有趣的是，有一种称作齐纳二极管（稳压管）的二极管，其击穿电压是受控的，这得到了很好的利用。我要特别强调一下稳压管中功率计算的重要性：你应该将稳定电压（或反向电压）乘以电流，来计算功率消耗。"齐纳"（zener）一词说起来很上口吧！

② 我这里指的是传统意义上的电流，这就是我选用了电流（current）这个词的原因。在电流发现的那个年代，人们利用所能拥有的仪器，觉得电流好像是能量的流动。因此他们选定了一个正连接点和一个负连接点，并假定电流是从正流到负的。实际上，在这个方向上并没有真正的"流动"，真正的流动，即电子的流动走的是相反的方向。但由于他们发明的那些公式并不受方向的影响，可以正确地解决问题，因此没有人去改变那个规定的方向。如果想谈论电子实际的行为，可以采用电子流的术语。如果谈论的是公式和图表，那我们就应该用传统的电流定义。

射极-基极结上有一个很像二极管的符号，它指明了这个二极管的存在（可以参考图3-4中的晶体管符号）。此外你应该留意到，我在不断重复着"电流流出（或电流流入）晶体管的基极"。晶体管是电流驱动型的器件，它们需要有大量的基极电流才能运行。在大多数时候，晶体管基极所需的电流要比流经发射极-集电极的电流小50~100倍，不过同电压驱动型器件相比，这个基极电流已经是相当大的数值了。

晶体管可以用作放大器和开关。下面分别介绍这两种应用。

1. 晶体管用作开关

在当今这个数字的世界里，晶体管常被用作开关（例如用来放大微控制器的输出能力）。由于这是一种相当普遍的应用，因此我们将讨论一下这种应用的一些设计准则。

(1) 饱和

当将晶体管用作开关时，你永远应该考虑其需不需要工作在饱和状态。所谓饱和，就是你给基极输送足够大的驱动电流，以使集电极流过尽可能大的电流。许多时候，当我看到工程师对着无法正确工作的晶体管挠头时，找到的问题往往都是基极没有得到足够的电流。

(2) 晶体管的类型要用对

作为开关使用时，要用NPN型的晶体管来控制接地的引线，用PNP型来控制接V_{cc}的引线。一开始你可能会觉得这有点奇怪。难道他们不都可以像开关一样工作吗？是的，它们都能像开关一样工作，但是它们基极上的二极管压降存在着重大差别，尤其是当你的电源只有0~5V的范围时。请考虑以下的两个设计（如图3-4所示）。

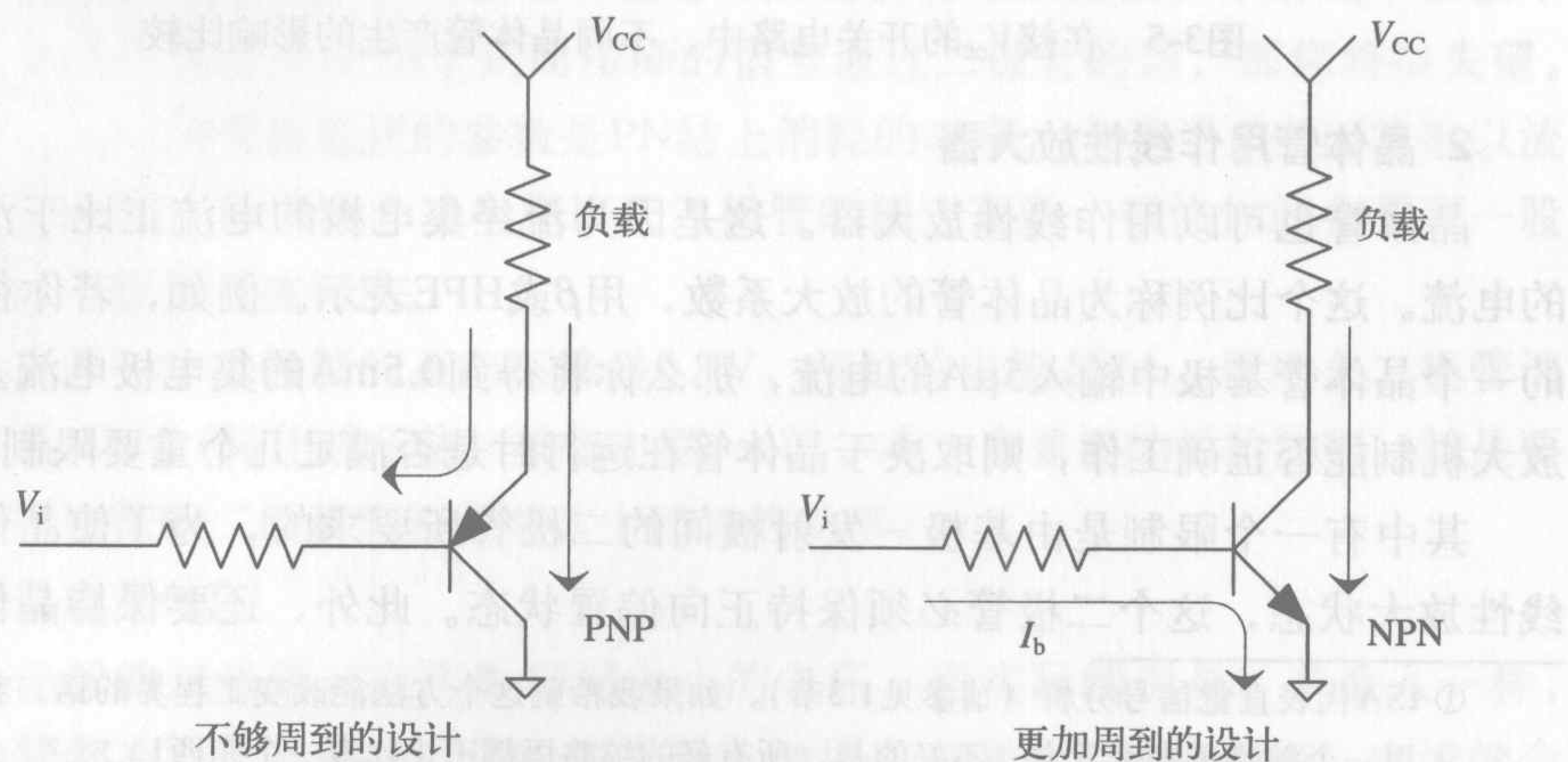


图3-4　在接地开关电路中，不同晶体管产生的影响

先让我们对图中左边的这个不够周到的电路做一点点直觉信号分析（ISA[①]）。当我们降低输入电压时，电流将流过基极。但发射极－基极结是个二极管，是不是？这意味着不管基极的电压是多少，发射极的电压总得比它高0.7V。即使你将输入电压拉低到0V，由于基极有电流流过，基极的电压将比0V稍高。发射极的电压则将比基极的电压再高0.7V。因此，在基极这一点上的任何电压变化，都将反应到输出上。现在再来看右边这个比较周到的设计。当我们把输入信号拉高[②]时，如同前一个设计一样，电流将流过基极，但你看到了这里的差别没有？在第二个设计中，输入电压可以做较大范围的变化，但只要晶体管还处于饱和状态，从集电极到发射极的输出的压降就将保持不变。

在相反的配置中（如图3-5所示），则是PNP晶体管工作得更好。在开关的应用中，控制V_{cc}引线的负载时，用PNP更为可靠。对于图中的两种情况，断开晶体管都不难，只要基极相对发射极的正向偏压小于0.7V，电流就将停止流动。

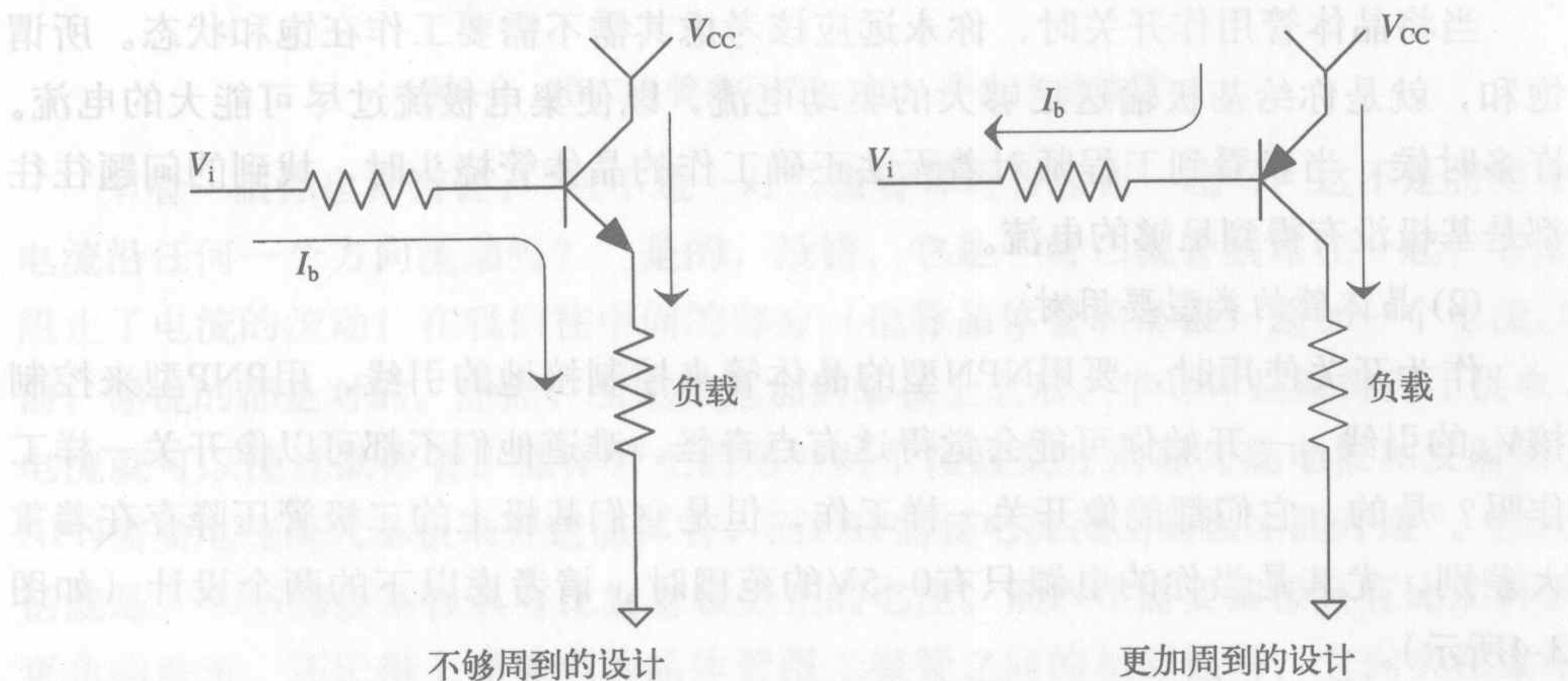


图3-5　在接V_{cc}的开关电路中，不同晶体管产生的影响比较

2. 晶体管用作线性放大器

晶体管也可以用作线性放大器。这是因为流经集电极的电流正比于流经基极的电流。这个比例称为晶体管的放大系数，用β或HFE表示。例如，若你往β为100的一个晶体管基极中输入5μA的电流，那么你将得到0.5mA的集电极电流。但这个放大机制能否正确工作，则取决于晶体管在运行时是否满足几个重要限制条件。

其中有一个限制是由基极－发射极间的二极管所要求的，为了使晶体管处于线性放大状态，这个二极管必须保持正向偏置状态。此外，还要保持晶体管工作

① ISA代表直觉信号分析（请参见1.3节）。如果我希望这个方法能改变工程界的话，我就必须使用一个缩略语来表示它。不好的是，所有好的缩略语都不止代表一个东西！

② 原书为“拉低”有误。——译者注

在非饱和状态。饱和将使晶体管退出线性区，使输出出现削波之类的奇怪现象。这些限制因素意味着，设置线性晶体管放大器是一件很有技巧的工作。我们必须注意晶体管的偏置和HFE，但不幸的是，不同元件的HFE存在着显著的个体差异。近来我已经很少单独使用晶体管来做线性放大器了，这有两个原因：首先是上面提及的元件参数的个体差异较大（当你要生产成百万的电路时，这是一个真正的问题），第二是因为运算放大器（我们将在后面介绍）已经特别便宜[1]且易于使用。如果你需要利用晶体管的功率能力，那你应该想办法将其同运放配合使用，以降低难度。

3.1.4 场效应晶体管（FET）

FET要比晶体管和二极管发明得晚。为什么要发明这么一个新器件呢？很简单，因为FET的某些特性很有用，在实际应用中极其需要。FET有吸引力的主要原因在于，其输出特性基本上相当于一个取决于输入电压的可变电阻。FET的输出端分别称为漏极和源极，而输入端则称为门极（如图3-6所示）。

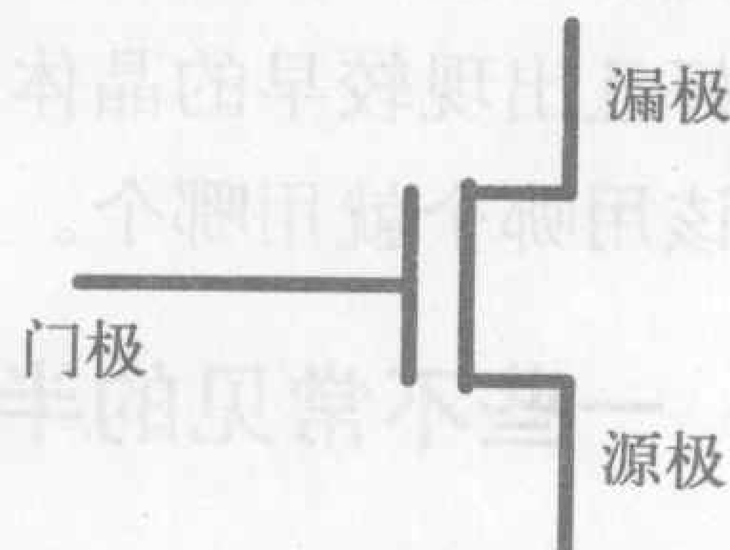


图3-6 场效应晶体管

为了使一个FET开通，其门极上几乎不需要有电流流过（而只需要施加一个电压即可）。这使FET成了放大弱信号的理想器件，因为其不会显著增加信号的负担。事实上，有些性能较好的运放使用FET作为输入端，其原因就在这里。不过FET也有不好的地方，它比晶体管容易损坏。FET对静电和过电压比较敏感，因此在使用这类器件时，请注意其最大定额参数。

FET的漏极到源极的连接特性特别神奇，就像一个通过门极电压控制的电阻一样。这实际上使FET成了一个电子控制的可变电阻。由于这个原因，所以我们常常可以在电路中看到利用FET建立的可变增益控制。FET的漏极－源极连接特性在双向都跟电阻一样。这就是说，电流是可以沿两个方向流动的。然而，FET的漏极－源极之间往往跨接有一个内置的反偏二极管。因此，在这个二极管反偏时，FET输出引脚的表现类似电阻，而在这个二极管正向偏置时，则表现为一个二极管。

当FET用于开关模式时，有一个需要特别注意的参数，就是RDSon（FET的导通压降）。这是当FET完全导通时，漏极到源极的电阻。RDSon的数值越低，你损

① 现在购买一个4运放的集成块要便宜过买3、4个晶体管，因此如果没有特别的需要，你就不必去自找麻烦。

失在FET上转换成热的功率就越少。FET上的电压等于流过的电流乘以RDSon，发热的功率则等于该电压乘以通过的电流。

只要欧姆定律仍然成立，电阻就等于电压除以电流。电阻的倒数或1/R等于电流除以电压，这被称为电导，其单位是姆欧[①]。FET的电导相当于晶体管的β或HFE，它就是FET的增益，也称为跨导。由跨导可以确定FET的输出电流：若在FET的门极上输入X伏特，那么乘以跨导，你就将得到Y安培的电流从漏极流到源极。

跟晶体管一样，从输入到输出的这个增益的个体差异也很大。当用于线性模式时，你要么需要对所用的元件进行个别化处理，要么需要建立某种反馈控制方法来补偿其差异，以获得希望的结果。

依我的经验，我知道有些工程师十分喜欢使用FET，而另外一些人则喜欢使用表现良好且出现较早的晶体管（BJT）。我的建议是，把两个都放在你的工具箱里，工作时该用哪个就用哪个。

3.1.5　一些不常见的半导体器件

在半导体的世界里，以下的这些器件你可能听说过，也可能从未听说过。

达林顿管：这种晶体管采用了两个普通的晶体管，二者抱在一块以增大增益，这一点可以从达林顿管的表示符号看出来。需要注意的是，在达林顿管中，基极－发射极的二极管压降基本上翻了一倍。

SCR：当你构建一个PNPN结构时，得到的就是SCR，其全名是可控硅整流器（silicon-controlled rectifier）。它本质上是一个二极管和一个晶体管的组合，它可以很容易地对大电流进行开关控制。需要警惕的一点是：你可以开通它，但不能断开它。只有当流经SCR的电流低于其保持电流（一个很小的电流）时，它才会关断自己。SCR是晶闸管的一种。

TRIAC：它是SCR的一个兄弟，也是晶闸管的一种。你可以把它看成是反向背靠背的两个SCR，因此它是一个很有效的交流开关。它常见于固态继电器等场合。

IGBT：全称是绝缘栅双极型晶体管（Isolated gate bipolar transistor），你可以将其看成是晶体管和FET的某种组合。它利用一个FET来迫使负载电流流过一个大

① 这个单位也称西门子，源自大家熟知的商标名称西门子，我们可以在今天的许多小电器上见到这个商标（当然，这个单位实际上是源自创立西门子公司的那个人的名字）。不过我个人则更喜欢使用姆欧这个单位名称，它更合理，因为它是欧姆的逆序。我不知道姆欧来源的故事，若是本书的发行足够成功，保证能够出第二版的话，我希望某个比我更精明的读者能够指点我找出姆欧的出处。

晶体管。

各种半导体器件其实并没有很大的差别，它们都是一些由P型材料和N型材料构成的基本结构。令我惊叹的是，仅仅几个基本的部件，就可以产生出这么多的器件。半导体已经使这个世界发生了翻天覆地的变化，这是我们大家都看得到的。不过，魔鬼总是存在于细节之中！有一点我再怎么强调都不过分，那就是你必须仔细阅读所使用的元件的参数表。你对元件的特性了解越多，你的设计就会越好。

3.1.6 功率和发热管理

所有电器设备的一个共同问题是，只要它工作，它就发热（超导除外）。这是因为在所有的器件中都存在一定大小的等效电阻（在后续内容中将会介绍）。电阻乘以流过的电流就是压降，压降乘以电流就等于功率。由于欧姆定律的作用是不可避免的，因此这个功率必定转化成热量。发热是电子器件老化和损坏的主要原因，因此学习一下发热管理是很有必要的。让我们从里到外开始介绍这个内容。

1. 结温

在半导体中，所有的魔术都发生在一个叫做“结”的地方。当器件工作时，发热的地方就在结上。结有一个能承受的最高温度，当达到这个温度时，就可能会发生某些故障。

2. 外壳温度

结总是位于某种外壳里面的。当你需要测试一个设计时，由于你无法测量结温，因此不得不测量外壳的温度。从结到外壳总存在着温度降落，其数值通常会给出在元件的参数表中。如果参数表里说结到外壳的温度降落是15°C，那么你可以预期结温将比你测得的温度高15°C。这个地方就是一个合格工程师可以自由发挥、编造数据的地方。如果老板要求你尽可能把器件的运行潜力挖掘到其容许的极限，那么你就可以告诉他，根据参数表的要求，你所需要的外壳温度应该比结温低30°C。由于他很可能不知道该从哪里得到这些信息，因此他也许会相信你的话，这样你的设计就会更加可靠。

3. 散热器

外壳会热到什么程度，这取决于上面所安装的散热器的情况。外壳本身能够将一部分的热量辐射到周围的空气中去。如果这还不够的话，则可以加一个散热器。你应该注意一点，与“散热器”的英文名称“heat sink”所暗示的不同，散热器并不是把器件的热量可以“丢”（dump）到里面去的一个“洞”。散热器可以更

精确地理解成一种散热方法，它可以更有效地把热量传递到周围的环境中去（通常是空气）。

散热器的功能是获取温升的热量，并将其散发到周围的空气中去。散热器的能力大小是用°C/W来衡量的。这个参数表示，当贴有该散热器的元件产生1W的热量时，元件将升高多少度的温度。例如，若让一个3°C/W的散热器负担20W的发热，那么贴在该散热器上的功率器件就将存在比周围温度高60°C的温升。

散热器可以看成是热导体。正如有些金属的导电性能比其他金属要好、是电的良导体一样，有些金属也是热的良导体。通常这两种特性是走在一起的，即导电好的金属，导热也比较好。铝比钢铁的导电性能好，同时它也比钢铁的导热性能好。铜是我们周围最好的一种电导体，同时也是最好的热导体之一。从这些术语的角度来看，散热器是把热量从器件上引走了。就跟（直流）电流是单向流动的一样，热量也总是从较热的地方向较冷的地方流动。实现热量流动的方法有很多种，下面分别予以介绍。

4. 辐射

一旦散热器变热了，它就将发射红外线。随着能量往外辐射，散热器就会变冷。你是否曾想过这个问题：为什么好多散热器都是黑色的？这是因为黑色[①]是一个高效的辐射颜色，这跟黑色能够吸收更多的红外线是一个道理（如果你曾在太阳底下穿过黑色衬衣，你就可能会注意到这一点）。只要周围较冷，并且太阳没有照着它，它就将把热量辐射出去。尽管辐射是散热的一种方法，但在今天的大多数电子设备中，还有比这更好的散热方法。

5. 对流

散热的最好方法是让空气从散热器上流过，这就是对流。有两种方法实现对流。一种方法是要适当地放置散热器，以使靠近散热器的热空气能够上升，较冷的空气能够填补相应的位置并被加热，这个过程将一直重复下去（如图3-7所示）。大多数散热器都有一些关于在自由空气中使用的参数指标，用以描述散热器在自由空气中的功能。

一点说明：自由空气中的对流依赖于重力的作用，没有重力的话，热空气就不会上升并被冷空气取代。因此，若你有幸参与太空船上的一项实验，那么你就不能指望采用自由空气来进行冷却！

通过让更多的空气流经散热器，可以极大地提升散热的效果。这通常需要使用某种类型的风扇。添加风扇之后，散热器的散热能力提高达10倍之多的情况并不

① 从散热来讲，颜色不是主角，但它确实有帮助，如果你真的想利用它的那一点点散热能力，那就用黑色（不过稍微多用一点点金属将起到同样的效果）。

少见。如今的大多数设备都普遍具有嗡嗡的声音，原因就在于采用了散热器风扇。

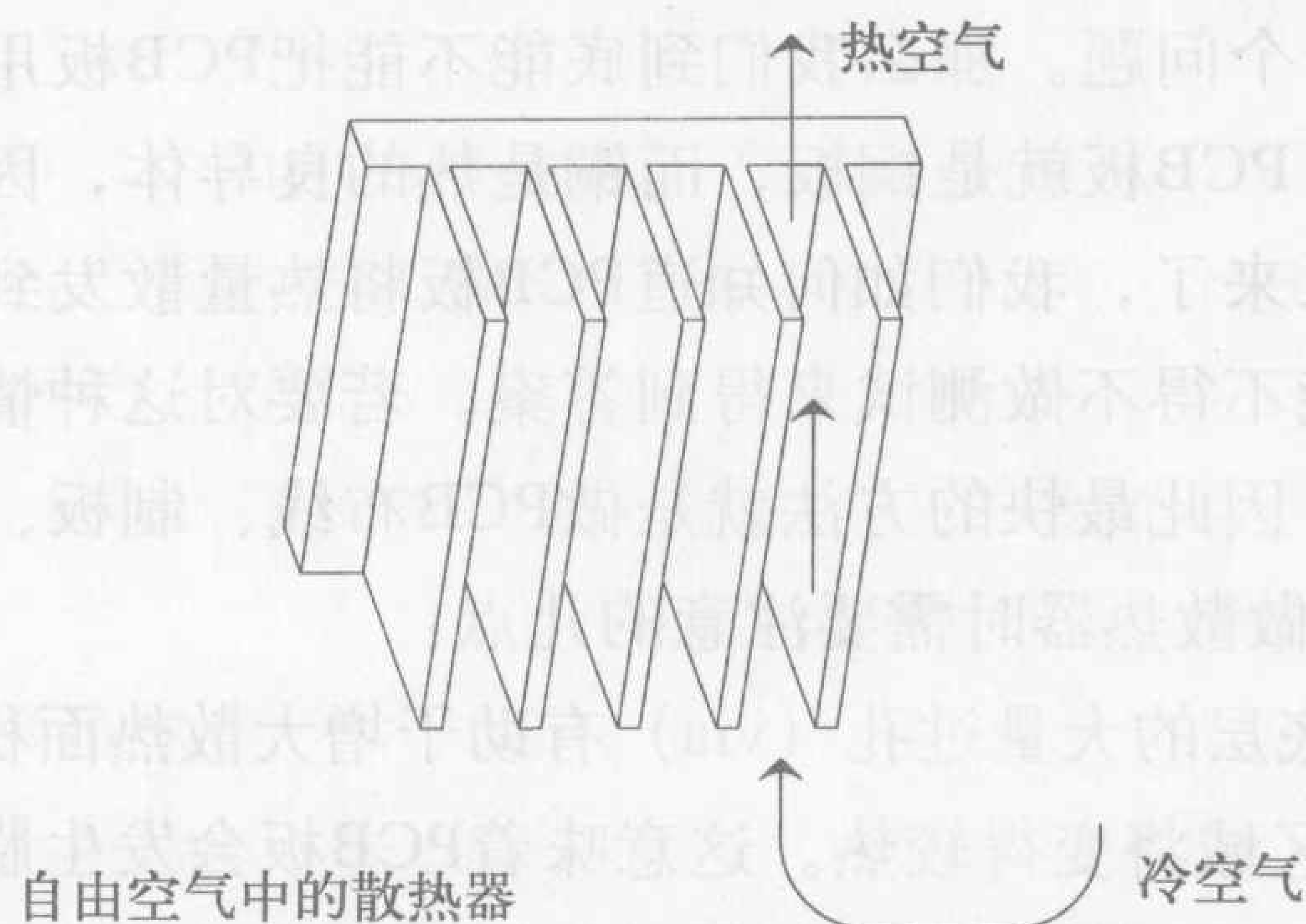


图3-7 散热器上的对流

散热器接触空气的面积越大，散热能力就越强。由于这个原因，所以你会看到散热器上有很多鳍状的突起。鳍状突起的数量越多，接触空气的面积就越大，传送热量的效果就越好。

有人可能会有这么一种想法，要是能够将这些热量收集起来，并转化成功率不是很好吗？我知道有一种热电元件，当你加热它的时候，就可以产生电，因此不能说有这种想法就是没长脑袋。我想我以后也许会去做这个设计，如果你们中的某个人读到我这个点子后，赶在我前面实现了这个想法并赚到了百万美元，那你只需支付我其中的百分之一！

6. 传导

移动热量的另一种方法是传导。热量就是以这种方式从器件上跑到散热器上的，热量在散热器内部的传递靠的也是这个方法。传导移动热量的效果相当不错，但是为了让热量流动，接收热量的地方必须比提供热量的地方冷。通常利用液体来把热量从很热的东西上传导出去，核反应堆、汽车发动机的热量就是这样引出来的。不过最后热量还得去别的其他地方。这就是我们会在汽车的前部看到一个辐射器的原因（这个辐射器用来将防冻剂所收集的热量散发到空气中）。我的小船上的发动机则利用整个湖水来做散热器，它无需辐射器，因为相对于数百万加仑（gal，1 gal＝3.785 L）的湖水，小船是微不足道的，它没有足够的功率来使湖水的温度哪怕是升高零点几度①！

① 你可能会问：“不谈温室效应，光看散热器往大气中排放的热量，这会不会产生什么不良影响呢？”请你考虑一下，假定全世界每套房子仅灯泡这一项，平均往大气中排放500W的热量，总共考虑大约10亿套房子，这不是一个很大的热量吗？它足以使地球的温度升高了吧？与其考虑这类的问题，我宁愿回到化学课堂去探究深入的解决之道。不过，积少成多，若我们不断产生出越来越多的热量，那么早晚有一天我们将把自己煮熟！

7. 利用PCB板散热

这是我常常听到的一个问题。那么我们到底能不能把PCB板用做散热器呢？答案是肯定的。事实上，PCB板就是铜板，而铜是热的良导体，因此它自然可以做散热器。好啦，问题又来了，我们如何知道PCB板将热量散发到周围空气中去的效果好坏呢？我们可能不得不做测试来得到答案。若要对这种情况进行计算的话，那变数真是太多了。因此最快的方法就是做PCB布线、制板、焊接元件，然后试验。以下是用PCB板做散热器时需要注意的几点：

- 连接PCB板顶层和底层的大量过孔（via）有助于增大散热面积。
- PCB板的这些过孔区域将变得较热。这意味着PCB板会发生膨胀、收缩。随着使用时间的积累，这可能会引起机械破坏，甚至会使焊点及PCB板的连接开裂。
- 采用PCB板散热的话，我建议将PCB板的温度控制在60°C以下。我告诉大家一个很有用的经验法则：如果金属表面热得使你感觉发烫，那它的温度就超过60°C了[①]。

8. 热扩散

当两种材料靠在一起的时候，材料之间的接触面积是影响热量传导的一个主要因素。而对于单一材料中的热量传导来讲，影响因素则是材料的厚度。

由此产生了一种称作*热扩散*（heat spreading）的技术。该技术将一块大而厚、且导热性能很好的材料铆接在发热的部件上，作为高速的导热通道，把热量导向一个很大的散热器，而散热器上则集中了所有的鳍状突起，以散发热量。其思路在于让热量尽快离开，从而使器件具有较低的结温。

你猜它有效吗？事实是它能够起作用，但其效果牵涉到很多的变数（譬如热扩散材料以及散热器其余部分的热导率等），跟PCB板的情况一样，我们也需要到实验室去做试验，才能确定其是否真的起作用或有帮助。请记住，在半导体的任何两个部分之间都有一个结，尽管结的周围处处都有温度梯度，但结越少，散热器就工作得越好。

经验法则

- 二极管是单向的电子阀门。

---

① 这并不意味着我提倡大家去触摸发热的元件来检查温度。我希望这个声明足以让那些喜欢打官司的人抓不到我的把柄。我不希望任何人烫伤！我本想多谈谈这类使我们这个世界受到削弱的恶意诉讼，不过这是一个完全不同的话题，因此就这里免了。完全可以说，如果你碰巧被烫着了，你就有理由相信你所碰到的金属的温度超过了60℃。请不要故意去摸，比手指更精确的测温方法多得很！

- 二极管有一个正向压降，你必须克服它之后才能让它导通。
- 晶体管是电流驱动型的。
- 晶体管在基极上有一个二极管，它需要偏置以后才能正常工作。
- 当把晶体管用作开关时，请注意其饱和电流。
- FET是电压驱动型的。
- FET不够耐用，你应该在自己的设计与元件的最大定额之间保留很大的余地。
- FET是静电敏感的。
- 请小心翼翼地研读你所用器件的参数表。
- 发热是电子元件的最大杀手。
- 大多数散热器把热量散发到周围的空气中，并且主要的散热方式是对流。
- 当你触摸一个部件时烫手，那它的温度就超过60°C了。
- 你可以将PCB板用作散热器，但请注意测试其效果。

3.2 神奇的运放

3.2.1 正确使用运放

我认为，运放是最多被误解、但却可能是工程师们的抽屉里最有用的IC器件。可以这么认为，如果你能够理解这个器件并且能够在实际中应用它，那么同没能做到这一点的人相比，你就有更大的优势设计出成功的产品。

3.2.2 运放的原理

你理解运放的工作原理吗？你相信发明运放的目的是为了能够更容易地设计电路吗？你也许不记得自己在实验室中最后一次被面包板电路中的怪异结果所困惑时的情况了。

在今天的数字世界里，大学课堂里讲授运放知识的常见做法往往是一笔带过，只给学生们留下一大堆常用的公式，而不真正去介绍其用途及背后的理论。因此，当一个工程师第一次设计有运放的电路时，如果电路不能按预期情况工作，那将令他感到极端的精神错乱。下面的讨论意在深入剖析运放的精华内容，以使读者对运放建立起一个直觉的理解。

请注意一下：请确保先阅读本小节。我的观点是，产生运放“错乱症”（我喜欢这样称呼）的一个原因，就是理论没有教对顺序。运放的讲授是要有个特别的

顺序的，请你在理解了每个小节之后，再往前赶！

首先，让我们来看运放的符号（如图3-8所示）。

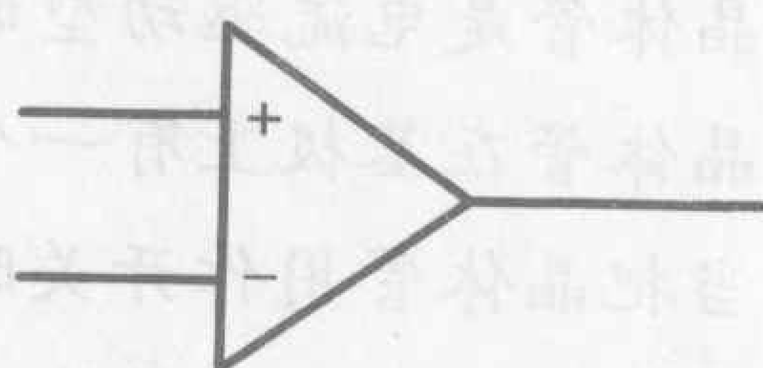


图3-8　基本的运放

运放有两个输入，一个为正，一个为负，分别用“+”和“-”来区分。

运放有一个输出。

运放的输入是高阻抗的。我再重复一次，运放的输入是高阻抗的。再多说一遍：“**运放的输入是高阻抗的！**”这意味着：运放对所接的（提供信号的）电路（几乎）没有影响。把这一点记下来，因为它十分重要。在后面我们将对此做更深入的介绍。由于这个“重中之重”常被忘记，因而会使前面提到的运放“错乱症”加重。

运放的输出具有低阻抗特性。对于大多数应用来讲，可以将其看成是一个电压源。

现在我们把运放表示成两个分开的符号（如图3-9所示）。

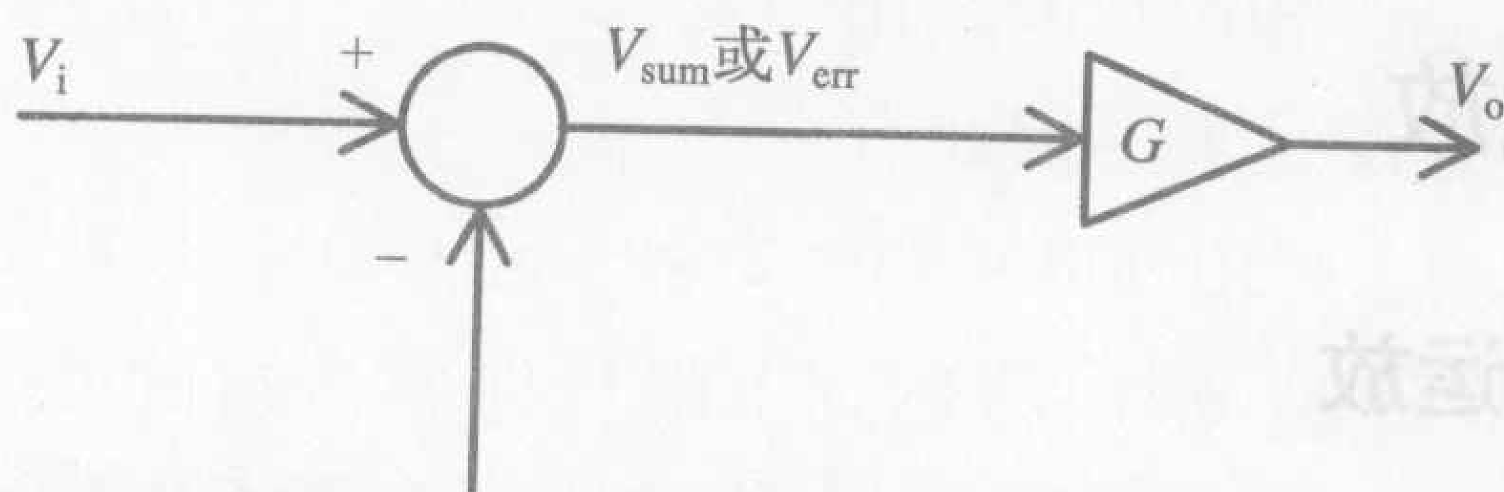


图3-9　运放真实的内部原理

你可以看到其中有一个求和块和一个放大器块。你可能还记得自己在控制理论课程中学过类似的符号。实际上，它们不是相似，而是同一件东西！控制理论不仅可以用来表示运放，后面还有更多的东西要用到控制理论！

首先，我们来讨论求和块。可以看到，求和块上有一个正输入和一个负输入，这跟运放的情况一样。请注意，负输入表示该点的输入电压要乘以－1。因此，如果在正输入端有1V，在负输入端有2V，那么这个求和块的输出就是－1V。这个块的输出等于两个输入之和，其中一个输入要乘以－1。这也可以看成是两个输入之差，可以用这个方程来表示

$$V_s = (V_+) - (V_-)$$

现在来看放大器块。这个块中的变量G代表运放要对输入电压之和放大的倍数，称为运放的开环增益。在这个例子中我们使用50 000的数值。你可能会说：“怎么会这么高呢？我刚刚用运放建好的一个放大电路，其放大倍数可没有这么高呀！”等一下我就会介绍运放用作放大的应用。查找一下生产厂家提供的参数表，就会

发现对于大多数的运放来讲，比我给的这个增益值更高的情况是很常见的。

下面让我们来做点分析。如果你在正输入端加2V，在负输入端加3V，输出上会有什么结果呢？我建议你实实在在地在面包板上试一下。我希望你明白，运放不仅可以、并且也能够运行在不同的输入端电压下。然而，一点点数学运算和一点点常识将告诉我们这将会发生什么事情。例如

$$V_{out} = 50\ 000 \times (2-3) = -50\ 000\text{V} \tag{3-1}$$

除非你有一个50 000V的运放接在一个50 000V的双极性电源上，否则你在输出上将看不到－50 000V。那么你将看到的是多少呢？先想一会儿再去测量。输出将达到最小的下限（最小“轨”）。换句话讲就是，它试图变得尽可能地负。如果你能够按以下的方式来想的话，那么这个结果就合理了：输出想达到－50 000V，根据上面的数学运算也应该这样，但是它没法达到，所以它尽可能往这个方向靠近。运放的“轨”（rail）就像火车的轨道——只要有可能，火车就将呆在它的轨道上。类似地，如果迫使一个运放跑出它的“轨道”，灾难就会发生，芯片中就会放出常见的魔烟来。运放的“轨”就是它能够输出的最大和最小的电压。你可以想到，这取决于供电电压和运放的输出参数。

好啦，现在把输入反过来，因此有

$$V_{out} = 50\ 000 \times (3-2) = +50\ 000\text{V} \tag{3-2}$$

这时会有什么结果呢？输出将达到上限！你怎么知道运放的输出上下限在哪里呢？这取决于你所用的电源以及具体的运放。你必须从厂家的参数表上查找相关信息。假定我们所用的运放是LM324，采用＋5V的单边电源。此时，当试图往负方向走的时候，输出将十分接近0V；而往正方向走时，输出将大约为4V。

现在我要指出一个值得大家注意的地方：运放的两个输入端电压**不是**彼此相等的！在许多时候，我看到工程师指望运放的两个输入端具有相同的电压数值。在分析阶段，这些设计者设想有电流流入运放的输入端，因而得出两个输入端的电压应该相等的结论（记住：运放具有高输入阻抗，流入的电流几乎为0）。而当他们实际做实验的时候，就会被输入上测出来的电压差别弄得精神错乱。

在下一部分中，我们将要讨论一种特殊的情况，在其中你可以假定运放的这两个输入端的电压是相等的。但它不是一种普遍情况，而只是一种常见的误解。你不应该掉入这个陷阱，否则你将根本无法理解运放。

上面用到的一些例子，代表了运放的一种十分简单的应用——比较器电路。这个电路是从模拟世界到数字世界进行转换的一个伟大的小电路。利用这个电路，你可以判断一个输入信号到底是比另一个信号高还是低。实际上，许多的微控制器在进行模拟到数字的转换时都会用到比较器电路。我们的周围到处都在使用比

较器电路。你认为路灯是怎么知道天已经足够黑了，应该点亮自己了呢？它里面的光敏元件上就接有一个比较器电路。交通灯是如何知道传感器上的压力已经足够大了，应该点亮行人通行的绿灯了呢？你可以打赌，其中也有一个比较器电路。

经验法则

- 运放的输入是高阻抗，它们对接入的电路几乎没有影响。
- 运放的两个输入可以具有不同的输入电压，它们没有必要必须相等。
- 运放的开环增益非常大！
- 由于运放的高开环增益及输出的（轨到轨）限制，如果一个输入高过另外一个输入，输出就将"靠轨"到其最大值或最小值。运放的这个应用常被称作比较器电路。

3.2.3　负反馈

如果你还没有读完上一小节，那么请返回去，阅读上一小节的经验法则。这些经验法则对于正确理解运放的作用十分重要。这些要点重要的原因何在呢？让我们回顾一点历史。在运放发明以前，工程师们只能使用晶体管来实现放大电路。使用晶体管的问题在于，晶体管是电流驱动型的器件，当它接在需要进行信号放大的电路中时，其负载作用必将影响到希望放大的信号。由于晶体管在制造上的公差，电路的增益将存在显著的个体差异。更重要的是，放大器电路的设计是一个很繁琐的过程，要求反复进行大量的试验。工程师们所需要的是一种简单的器件，它可以直接接在信号上，以对信号放大他们所希望的任何数值的倍数。该器件应该容易使用，并且只需要很少的外部元件。换句话说，运行（operation）这个放大器（amplifier）应该是相当容易的。这就是我记住运放的方法。运放（operational amplifier或op-amp）这个名称的另一个由来源于这种放大器的用途，它被用来建立模拟计算机的电路，以完成乘法及其他的运算。

让我们从前一小节所讲的特殊情况开始。首先，让我们返回前一个方块图（如图3-9所示），在其中加入一个反馈回路（如图3-10所示）。

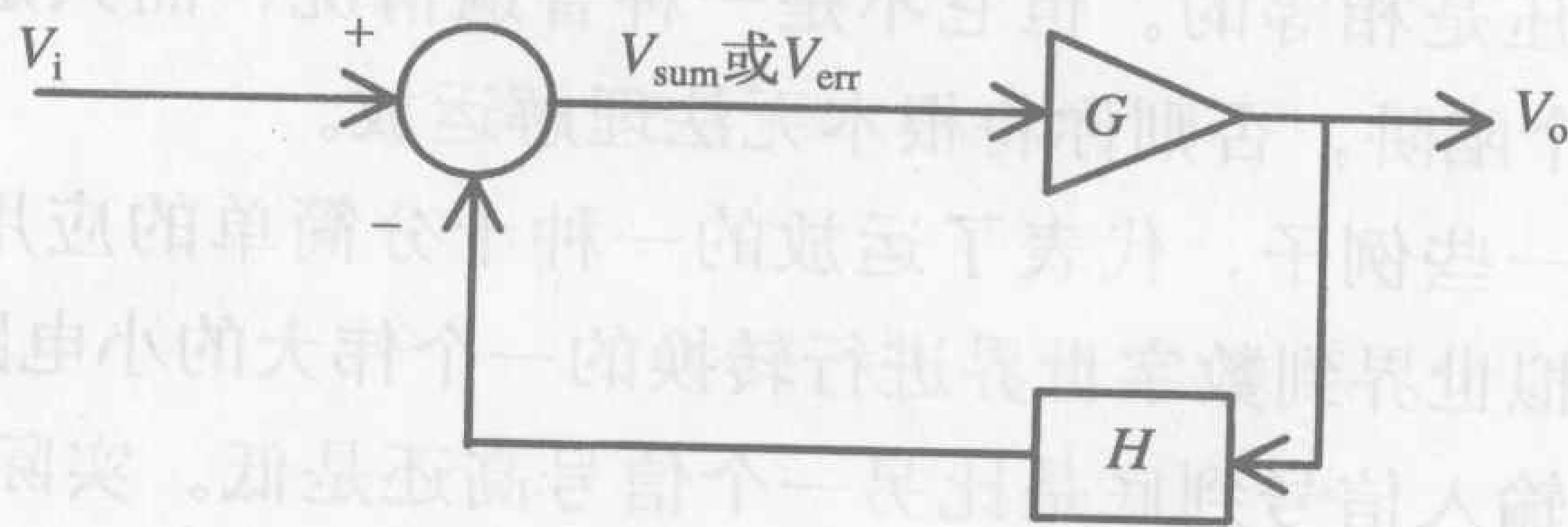


图3-10　在运放中加入负反馈

可以看到，我用G来表示前向增益或开环增益，而用H表示反馈增益（这个图对于那些已经经过控制理论训练的人来讲应该是十分熟悉的）。首先，我们看到输出被接到了负的输入端，这种接法称作负反馈。负反馈有什么好呢？让我们做一个试验。请将你的手放在比桌面高1in的位置，并保持这种状态。你现在已经在感受着负反馈了！你在用眼睛观察着，并感受着手到桌面的距离。如果你的手动了，你则会以相反方向的运动来作出反应。这就是负反馈。你用感觉把收到的信号变反，然后送回到你的手臂。当负反馈应用到运放时，发生的是相同的事情，输出的信号被送回了负输入端！输出信号沿着某个方向变化，将引起V_{sum}沿着相反的方向变化。

对于上面提到的负反馈配置，你应该已经有了一个直觉的把握。让我们再来看前面的图3-10，假定其中G的值是50 000，H的值是1。现在我们在正输入端施加1，并假定负输入端在开始时为零。这就在增益块G的输入上施加了“1”，输出将开始往正的最大值（正轨）方向跑。但当输出接近于1时，会发生什么呢？负输入也将接近于1！求和块的输出将变得越来越小。如果负输入变得高于1，则增益块G的输入将变成负的，从而强迫输出往负的方向走。当然，这将导致在增益块G的输入上出现正的误差，又开始使整个过程重复。那到底什么时候这一切才会结束呢？它将在负输入等于正输入时结束！在这个例子中，由于$H=1$，输出也将为1。

以上的一切你都在控制理论中学过了。让我们参照前面的图（图3-10），来看其基本控制方程：

$$V_o = V_i \times \frac{G}{1+G\times H} \tag{3-3}$$

当G很大时会发生什么呢[①]？分母中的1将变得不重要，方程将近似地变成$V_o=V_i\times(1/H)$。H在这里为1，所以近似地有$V_o=V_i\times(1/1)$，或

$$V_o = V_i \tag{3-4}$$

这是前面所述情况的特例，其中运放的两个输入当然也可以认为是相等的。请注意，**只有**存在负反馈时，才能使用这个结论。反馈增益为1的这个例子，展示了另一个十分简洁的运放电路——电压跟随器，其正输入端输入的任何电压，都将出现在输出上。

再让我们来看看下面这个图（如图3-11所示）。这是一个处于负反馈配置的运放。当你看到这个图时，你应该在脑袋中想到一个求和块与一个放大器块，就跟前面的图一样（如图3-10所示）。在这个配置中，你可以假定正输入和负输入是相等的。

① 记住运放具有很大的“G”！

我们在学校里学运放时，学的就是负反馈配置，它常常引起困惑。它只是一种特殊情况，一种应用极其广泛的特殊情况。然而，如果你没有用负反馈，或者你的输入和输出不在正常的运行范围之内，那你就不应该假定运放的两个输入是相等的。

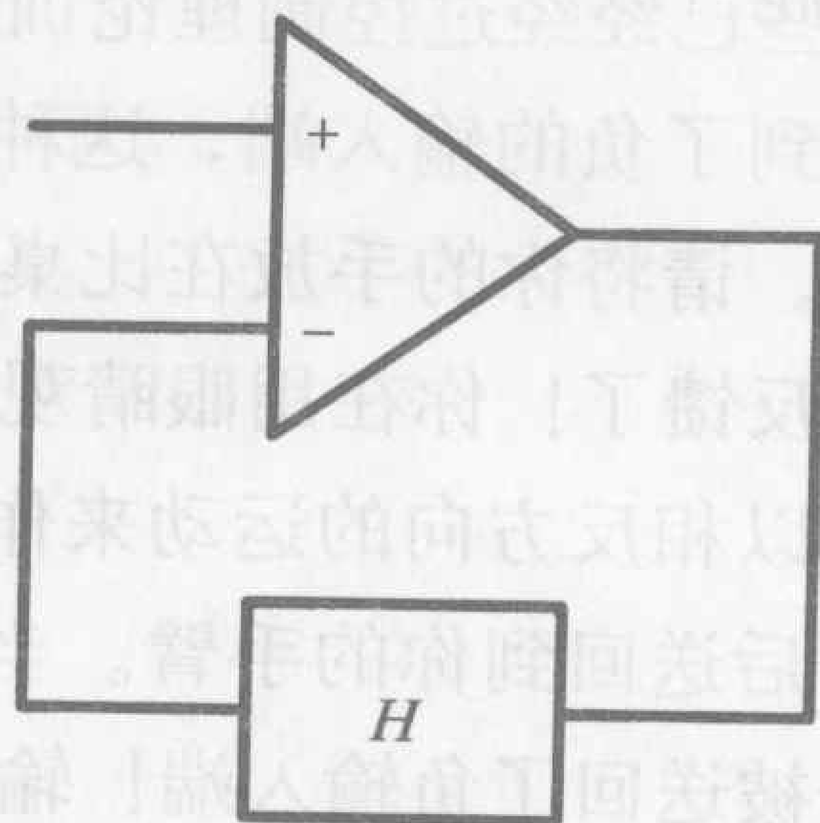


图3-11　拥有负反馈的原始运放符号

为什么负反馈配置的运放应用如此之多呢？还记得发明运放的原因是什么吗？以前做放大器很难，需要有更简单的方法！再让我们来看看运放负反馈的控制方程：

$$V_o = V_i \times \frac{G}{1+G\times H} \tag{3-5}$$

我已经证明过，当G很大时，控制方程近似为：

$$V_o = V_i \times \frac{1}{H} \tag{3-6}$$

你可以看到，V_i的放大倍数取决于H的值。如果我们让H等于1/10，那么$V_o = V_i \times (1/(1/10))$，或

$$V_o = V_i \times 10 \tag{3-7}$$

如何才能做到1/10的H呢？你还记得分压器电路吗？它在这个地方将十分有用，因为我们希望H等效于“除以10”。让我们把分压器电路插在H的位置，如图3-12所示（注意V_i是连接到V_+的）。

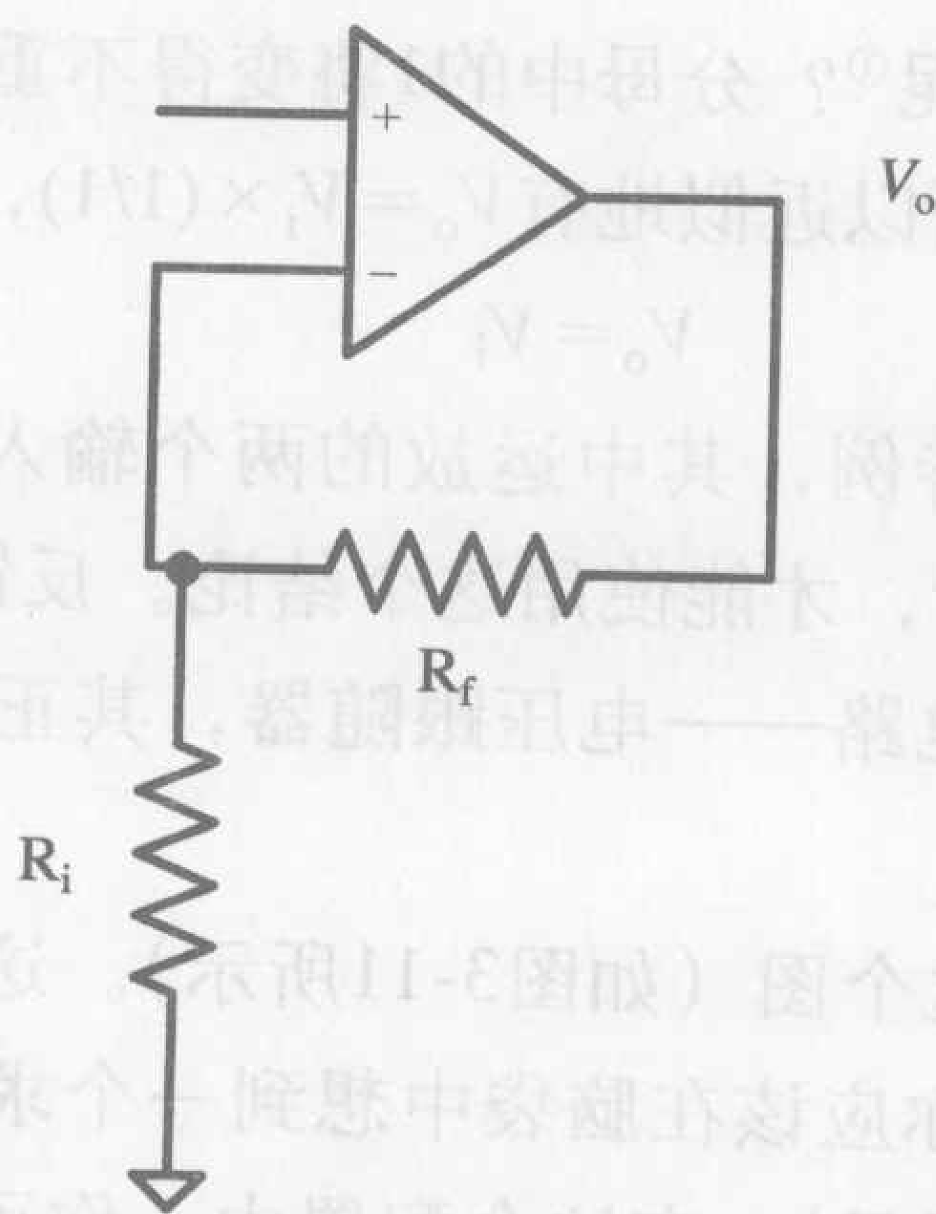


图3-12　负反馈为一个分压器

请注意分压器的输入来自运放的输出，即V_o，而分压器的输出则接到运放的

V_-。这样的话，运放的输入V_-会不会影响分压器电路呢？不会的，因为它拥有高阻抗！它不会影响分压器！（如果你无法领会这些，或不能得出这样的结果，那么请你返回去重读3.2.2节，直到能够领会为止！）由于分压器的输入端是接在一个（内阻很小的）电压源上，并且这个电压源的输出也不会受到分压器电路接入的影响，因此我们可以应用分压器法则，很容易地算出从V_o到V_-的增益。

$$\frac{V_-}{V_o} = \frac{R_i}{R_i + R_f} = H \tag{3-8}$$

因此有

$$\frac{1}{H} = \frac{R_i + R_f}{R_i}\text{，或经过少量代数运算有}$$

$$\frac{1}{H} = \frac{R_i}{R_i} + \frac{R_f}{R_i} = \frac{R_f}{R_i} + 1 \quad \text{或} \quad \frac{1}{H} = \frac{R_f}{R_i} + 1 \tag{3-9}$$

这样，我们就得到了这个运放电路的增益。下面让我们用另外一种方法来分析。返回到公式（3-8）

$$\frac{V_-}{V_o} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \tag{3-10}$$

我们学过，在负反馈这种特殊的情况下，可以认为$V_+ = V_-$。这是因为负反馈回路将迫使输出返回到负的输入端，从而使之趋向于$V_+ = V_-$的状态。因此，让我们假定$V_i = V_+$（这里V_+是加在运放的正相输入端的电压），因此我们可以用V_i代替V_-，于是方程变成了下面的样子

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \tag{3-11}$$

我们实际想知道的是：从开始输入V_i到最终输出V_o，分压电路到底对V_i起了什么作用？让我们做点数学运算，结果得到以下的公式

$$V_o = V_i \times \frac{R_i + R_f}{R_i} = V_i \times \frac{R_f}{R_i + 1} \quad \text{或} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_f}{R_i} + 1 \tag{3-12}$$

请注意，这就等于$1/H$。你看到没有，整个电路的增益由两个简单的电阻控制着！请相信我，这要比晶体管放大电路的理解和计算容易得多。你可以看到，这个放大器的运行是相当容易理解的。

经验法则

- 运放的负反馈配置是唯一可以假定$V_- = V_+$的情况。
- 运放的高输入阻抗和低输出阻抗特点，使我们很容易计算由简单电阻网络构成的反馈回路的影响。
- 运放的高开环增益特点，使得负反馈这种特殊情况的输出增益近似等于$1/H$。

• 运放是为了易于实现放大而发明出来的，所以不应把它搞得那么难！

3.2.4 正反馈

什么是正反馈？让我们看一个现实世界的例子。有一天你正在工作，你的老板过来对你说："嗨，你的项目做得不错，你做的那个新运放电路很令人佩服。"在你听了他的称赞之后，你会发现你自己工作得更加卖力了。这就是正反馈。输出被送入了正输入端，结果输出朝同一个方向走得更远了。让我们再来看看运放的图解（如图3-13所示）。

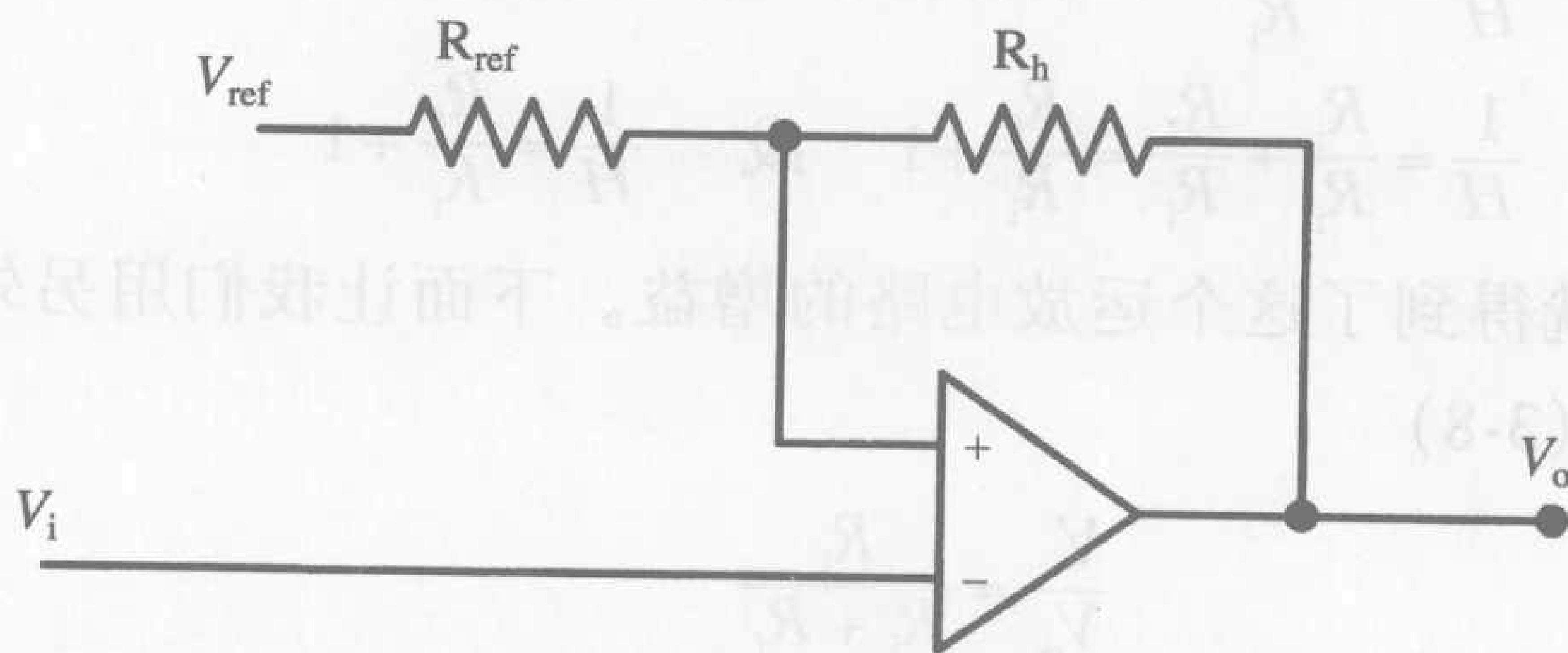


图3-13 运放的正反馈

现在我们需要做一点直觉分析。不要忘记我们在前面两小节里学过的经验法则。如果有需要，请现在就去复习。

首先，在V_i上施加0V。请注意在我们现在这个情况下，输入是连接到V_-的。你也看到了，输出通过一个电阻连接到了参考电压V_{ref}。V_+处的电压是多少呢？V_+处的电压等于V_-处的电压吗？不！（不相信我？请去查看经验法则！）

V_+处的电压到底是多少呢？这取决于两个因素：V_{ref}上的电压和放大器的输出电压V_o。那V_+处的输入到底能否负载这个电路呢？不，它不能！在开始分析前，让我们假定$V_{ref}=2.5V$，假定输出等于0V。现在V_+上的电压是多少呢？由于V_o等于0，因此我们所拥有的是一个基本的分压器电路。假定$R_{ref}=10k\Omega$，$R_h=100k\Omega$，因此有

$$V_+ = V_{ref} \times \frac{R_h}{R_h + R_{ref}} = 2.5 \times \frac{100\,k\Omega}{110\,k\Omega} = 2.275\,V \qquad (3\text{-}13)$$

因此在V_+上的电压是2.275V，V_-上是0V。那这个运放到底有什么用呢？让我们参考我们早前学过的运放示意图（如图3-14所示）。

我们看出了什么没有呢？V_{sum}等于$V_+ - V_-$，对于我们这里的具体情况来讲，就是$V_{sum}=2.275V$。由于V_o等于$V_{sum} \times G$，因此输出显然将跑到正"轨"上（如果这一点对于你来讲不是显而易见的话，那么你应该再去复习3.2.2节）。现在我们的

输出处于正最大值，假定对于这个运放是4V（请记住输出正“轨”的大小取决于所用的运放，请每次查阅参数表来确定其数值。4V是LM324运放在0到5V供电时的典型值）。

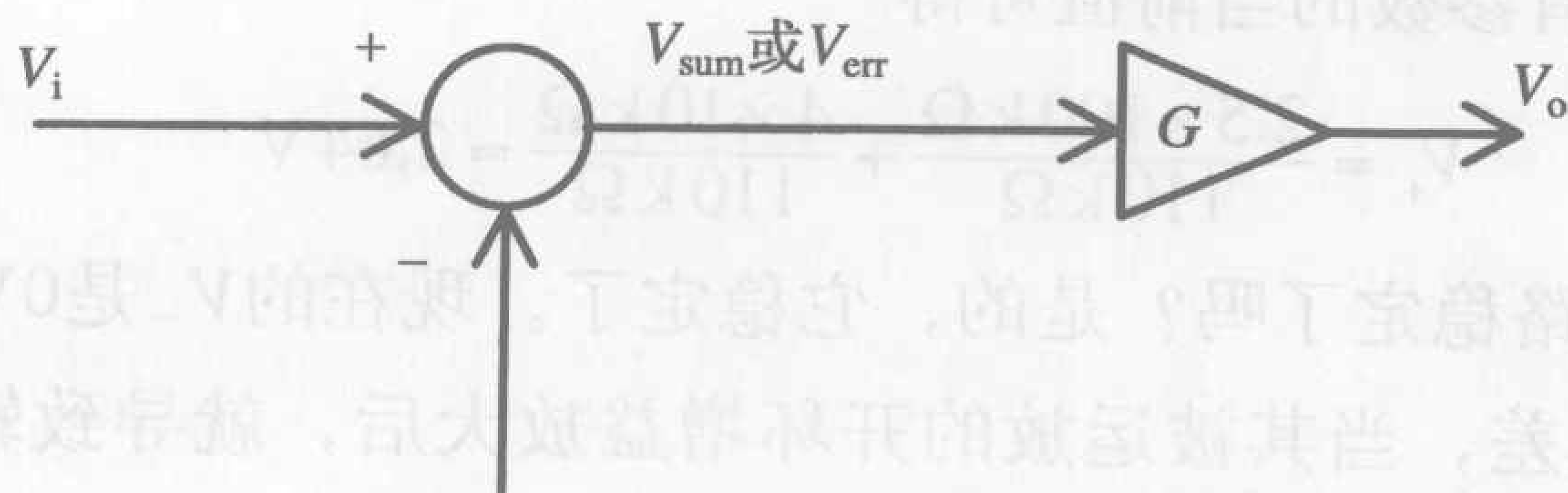


图3-14 运算的示意图

现在输出是4V，V_-是0V，那V_+是多少呢？它发生了改变！我们必须返回去，重新分析（你也许觉得我这是在兜圈，是吧？我们就应该兜圈！这也就是反馈所做的工作：输出影响输入，输入又影响输出，如此反复不断）。不过这次的分析跟负反馈的情况稍许有点不同了。我们现在不能再仅仅利用分压原理来计算V_+了，还需要使用叠加原理！

在使用叠加原理时，我们先将一个电压源置为0并分析结果，然后再将另一个电压源置为0并分析结果。最后我们再把两个结果加在一起以得到完整的公式。我们现在就来做这件事。在前面我们已经知道V_{ref}引起的结果。为了便于参考，我们再把正反馈图重画一遍（如图3-15所示）。

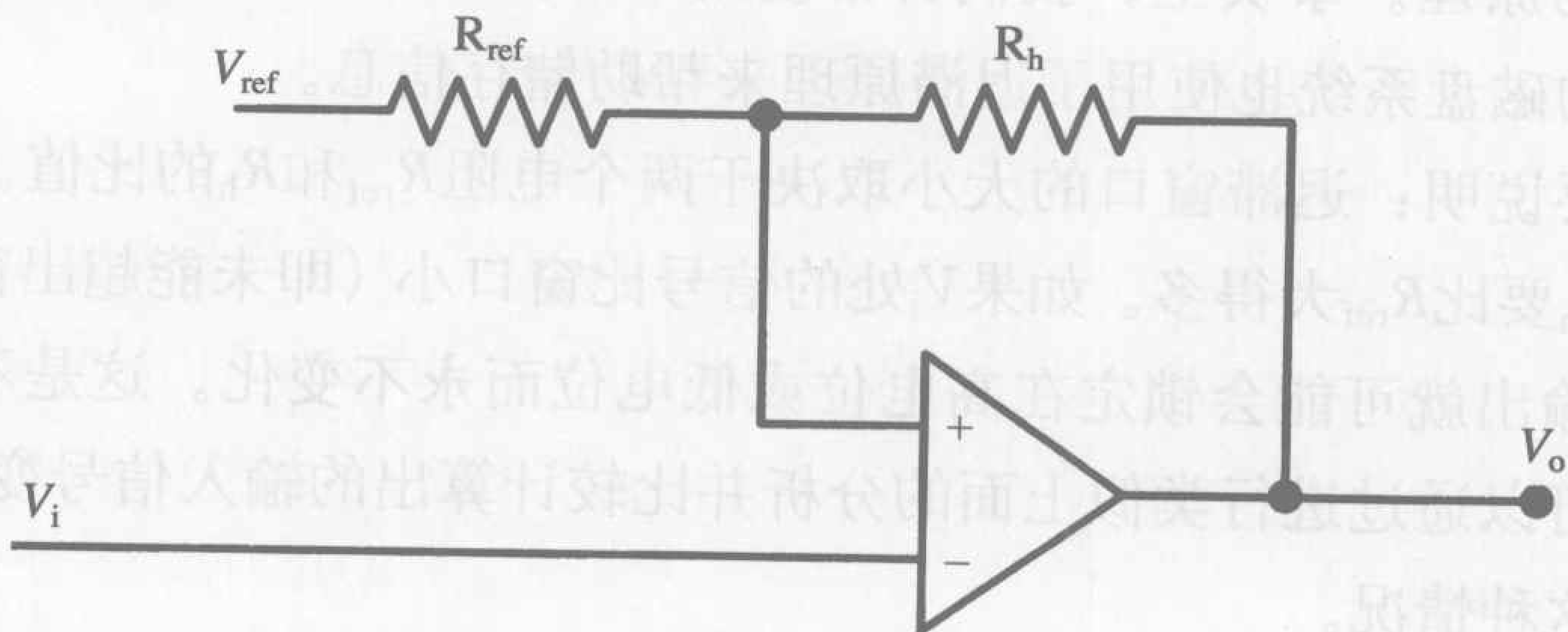


图3-15 运放的正反馈

根据分压原理，V_{ref}引起的结果是

$$V_{ref}\text{引起的}V_+ = \frac{V_{ref} \times R_h}{R_h + R_{ref}} \tag{3-14}$$

根据分压原理，V_o引起的结果是

$$V_o\text{引起的}V_+ = \frac{V_o \times R_{ref}}{R_{ref} + R_h} \tag{3-15}$$

两者共同作用的结果是

$V_+=$（V_{ref}引起的V_+）+（V_o引起的V_+），或

$$V_+ = \frac{V_{ref} \times R_h}{R_h + R_{ref}} + \frac{V_o \times R_{ref}}{R_h + R_{ref}} \tag{3-16}$$

现在代入所有参数的当前值可得

$$V_+ = \frac{2.5 \times 100\,\mathrm{k\Omega}}{110\,\mathrm{k\Omega}} + \frac{4 \times 10\,\mathrm{k\Omega}}{110\,\mathrm{k\Omega}} = 2.64\,\mathrm{V} \tag{3-17}$$

现在这个电路稳定了吗？是的，它稳定了。现在的V_-是0V，V_+是2.64V。这产生了一个正误差，当其被运放的开环增益放大后，就导致输出跑到了正“轨”上。它就是4V，也就是我们刚分析过的状态。

现在让我们作点改变，让V_-上的电压开始缓慢地沿着斜坡上升。在什么时候运放的输出将发生改变呢？在V_-上的电压刚好超过V_+上的电压（2.64V）的时候！这将引起负误差，导致输出摆动到负“轨”上。那这时V_+会有什么反应呢？它将变回到我们前面算得的2.275V。那我们怎样才能使输出重新变回到正呢？只要我们调节输入，使其小于2.275V即可。由于正反馈加强输出的变化，这就使得我们必须让输入沿着相反的方向走得更远，才能在输出上产生又一次的变化。

以上描述的效应称为“迟滞”（hysteresis）。它是运放采用正反馈配置时最常产生的现象。你也许会问，迟滞有什么用处。好啦，给你的房子供一下暖气看看吧。要是没有使用“迟滞”，你的暖气炉就会几秒钟开关一次。你的烤箱和冰箱也使用了同样的原理。事实上，我们日常使用的计算机，譬如我用来写作本书的计算机，其中的磁盘系统也使用了迟滞原理来帮助储存信息。

一点重要说明：迟滞窗口的大小取决于两个电阻R_{ref}和R_h的比值。在大多数典型应用中，R_h要比R_{ref}大得多。如果V_i处的信号比窗口小（即未能超出窗口的范围），那么电路的输出就可能会锁定在高电位或低电位而永不变化。这是不希望出现的现象，我们可以通过进行类似上面的分析并比较计算出的输入信号变化范围极限，来避免出现这种情况。

到此为止，我们已经完成了对运放的三种基本配置的讨论。现在让我们利用这些基本的配置，搭建一个简单电路。这个电路里有一个电压跟随器，它同一个使用迟滞原理的比较器相接，并采用一个LED（发光二极管）作为指示器（如图3-16所示）。

你应该在实验室里实际搭建一下这个电路，以对我们所讨论的内容获得直觉理解。请试着改变电路中各个参数，观测电路的反馈效果。请你注意，若我们替换输入电位器的标称值（譬如从5kΩ的换成100kΩ的），这不会影响比较器的切换电压。

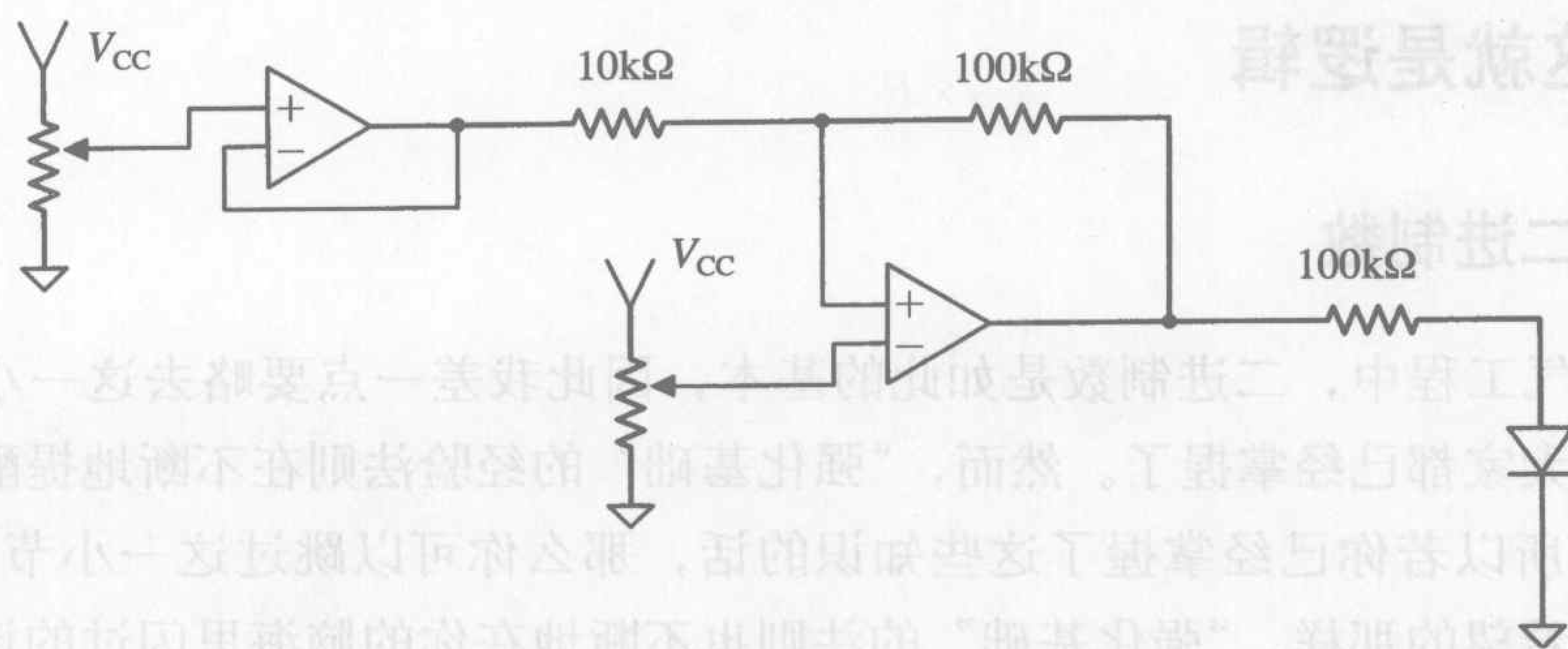


图3-16 简单的运放电路，供你进行实验以理解正反馈和负反馈

3.2.5 运放的其余知识

到此为止，你已经学完了运放的基础内容。利用这些知识，你能够对遇到的大多数运放电路进行分析，并且能够自己搭建一些十分简洁的电路。你也许会问：“滤波器也可以分析吗？”其实，滤波器只不过是随着频率变化而改变增益的放大器而已。我们只需简单地用一个电抗来替换电阻，就可以在电路中引入一个频率元件。你可能还会问：“振荡器也可以分析吗？”振荡器只不过是一种信号的时序非常重要的反馈电路而已，它们仍然遵从前面介绍的原理。我相信，对于任何学科来讲，领会其基础是我们所能做的最重要的事情。如果你理解了它的基本原理，那你可以在这个基础之上成长起来，并不断获得更高级的知识。而如果你没有这个基础的话，那么你就只能在自己选定的专业领域里挣扎着前行。

经验法则

- 运放的输入是高阻抗的，这意味着没有电流流进输入端。这一点再怎么重复都不嫌多，所以请原谅我再次重复。
- 运放的输出具有低阻抗特性。
- 只有在负反馈的情况下，运放的输入端才有$V_+ = V_-$。如果是正反馈的情况，它们未必相等。
- 当设置正确时，正反馈将产生迟滞现象。
- 正反馈可以将一个输出锁定在一个状态并保持在那种状态。
- 具有延迟的正反馈会产生振荡。
- 运放的发明是为了使事情更容易做，所以不要把它弄得太难。

3.3 这就是逻辑

3.3.1 二进制数

在电气工程中，二进制数是如此的基本，因此我差一点要略去这一小节，因为我以为大家都已经掌握了。然而，“强化基础”的经验法则在不断地提醒我不要这样做。所以若你已经掌握了这些知识的话，那么你可以跳过这一小节。不过，如果像我希望的那样，“强化基础”的法则也不断地在你的脑海里闪过的话，那么本小节你至少应该读上一遍。

二进制数是仅采用1和0这两个值来计数的一种简单计数方法。采用0和1这两个数十分方便，其理由我会在后面讨论。二进制也称以2为基数的计数制。也有采用其他基数的，例如以8作为基数（八进制）、以16作为基数（十六进制）等，但它们得到广泛使用的原因主要却在于，它们能够更为方便地表示2进制数。每个人都习惯使用十进制，它以10为基数。我们可以这样来考虑基数的概念：计数系统的基数就是这样的一个点，当你数到该点时，你往左边一列进1，并且本列又从0开始。例如，在以10为基数的情况下，你数1, 2, 3,…, 7, 8, 9，然后当轮到数10时，你会在左边一列添1，并且本列从0重新开始。在以8为基数的情况下，你仅数到7，然后你就得重新开始数本列，就像这样：1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11,…。在以16为基数的情况，数到15后就要开始重数，但为了遵从每列只用一位数字表示的惯例，我们用字母来代表10到15的数。如表3-1所示，表格最能表示清楚这种关系。

表3-1　十进制数和十六进制数

十进制，基数为10	十六进制，基数为16	十进制，基数为10	十六进制，基数为16
0	0	9	9
1	1	10	A
2	2	11	B
3	3	12	C
4	4	13	D
5	5	14	E
6	6	15	F
7	7	16	10
8	8	17	11

请再次关注一下，看在不同的基数下，一个列都是怎么重新开始计数的。你也许注意到了，我是从0开始数的。必须强调的是，0在任何计数系统中都是一个非常重要的部分，但人们一般容易忽视这个事实。将0包含在计数之中以后，你就

会发现十进制的进位点是在第10个数数完之后，八进制的进位点是在第8个数数完之后。对于其他任何基数的计数系统，也都有同样的关系。

现在返回到二进制或基数为2的情况。当我第一次看到二进制数的时候，我想："喔，好搞笑的一个计数系统呀。才刚往前移了个1，马上就又得重新开始了！"其计数是这样进行的：0，1，10，11，100，…。同样，表格最能说清楚问题，如表3-2所示。

表3-2 十进制、二进制、八进制和十六进制数的比较

10进制 基数为10	2进制 基数为2	8进制 基数为8	16进制 基数为16
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11
18	10010	22	12

请注意一下这个情况：在八进制和十六进制的进位点处，二进制也获得一个新的进位。这就是可以用八进制和十六进制方便地表示二进制数的原因。你也可以看到，十进制数的进位点则没能同二进制对齐得这么漂亮！

在这个表中，你可以看到另外一个特征，就是八进制中的20正好碰到十六进制的10。这是有道理的，因为其中一个的基数正好是另一个基数的两倍。你能推想到4进制会有什么样的特点吗？

以上的特点引出了二进制数的另一个秘密，即二进制数的每一位都是上一位的两倍（就像在十进制中，每一个1都相当于上一位中的一个10一样）。让我们来看表3-3。

表3-3　倍增的数字

十进制	128	64	32	16	8	4	2	1
二进制	10000000	1000000	100000	10000	1000	100	10	1

你可以将二进制数中为1的每一个位所代表的十进制值加起来，以得到相应的十进制数。以101为例，其右起第1列有个1，代表十进制的1；第3列有个1，代表十进制的4。因此1加4等于5，所以二进制的101就对应十进制的5。你也可以注意到，二进制数每增加一个位，你能够表示的数目的个数就增加一倍。例如，4位可以数到15，8位可以数到255（有些比较外向的工程师喜欢给朋友们表演用手指数到1023，以图使自己成为晚会的亮点。但他们的尝试往往会以失败收场）。

我们在十进制计数中学到的所有数学技巧，只需对所用的基数加以考虑，就可以适用于二进制。

例如，在十进制中，乘以十只需在最后面加个0，是吧？同样的规则也适用于二进制，但由于基数是2，所以乘以2时，只需在尾巴上添个0，并把原来的所有数字往左移就行。在十进制中除以10时，你只需砍掉最后一位，保留其余的（砍掉的是余数）。在二进制中，除以2遵从同样的规则，将所有的数字往右移一位，但余数总是0或1。这个规则很容易进行数学编程，这一点我们将在后面予以介绍。

不管怎样，大多数的电子器件都喜欢4位一组地处理二进制数。因此二进制数往往用十六进制或八进制来速记表示。这是一种很值得学习的速记表示方法。

在电子世界里，每一个二进制的数字常被称作一个“位”（bit）。8个位组成一组被称作一个字节（byte），4个位组合在一起则被称作“半字节”（nibble）。所以，如果一个字节太大不能处理，那你就要试着每次处理半个字节。

回到正题上来，由于十六进制数可以很好地表示半个字节，而一个字节包含着两个4位的半字节，所以你常常会看到人们用两个十六进制的数字来表示一个二进制字节的信息。例如，0101 1111可以表示成5 F，1110 0001可以表示成E 1。实际上，通过查找十六进制数字与二进制半字节之间的对应关系表（表3-2），可以很容易确定这些结果。

总之，二进制是只采用两个符号来计数的一种方法，二进制数常用十六进制来进行速记。在逻辑电路发明出来以后，由于其仅使用两个符号，即开和关，或高和低，来表示信息，这就使得它与二进制数及二进制数学很好地结合到了一起。

3.3.2　逻辑

在过去的50年中，成长速度最不可思议的一个行业，就是用电子学的方法，

基于布尔逻辑的原理来处理数据的工业。布尔逻辑是由George Boole于19世纪中叶发展起来的，尽管它基于很简单的概念，但却可以产生出许多十分复杂的东西。

在布尔逻辑中，“1”表示真，“0”表示假。在实际的电路中，1通常可以是3~5V间的任何信号，而0则是0~2.9V间的任何信号，但重要的是，在逻辑的世界里仅有两个状态，即1或0。这是一个或黑或白的世界。可以这么说，工程师们毫无疑问地能够很快领会数字的世界。工程师们都希望自己的世界遵从容易预测的规则，我还没有遇到过一个例外的人。“尽可能简单”是一句口头禅，将世界划分为两种状态无疑可以使事情简化。有一点需要我们予以重视，即在电路的某些点上，当前的数值到底是代表1还是0，这往往需要我们进行判断。

在学习逻辑时，我们需要用到一个对输入和输出的逻辑关系进行描述的真值表。其中，输入通常被列在左侧，输出则放在右侧。有一些基本器件用来处理逻辑，我们称之为逻辑“门”。让我们从这些基础开始。

1. 非（NOT）门

它非常简单。非门将任何输入的信号变反。输入1，则输出0；输入0，则输出1。让我们用一个晶体管来制作一个非门（如图3-17所示）。

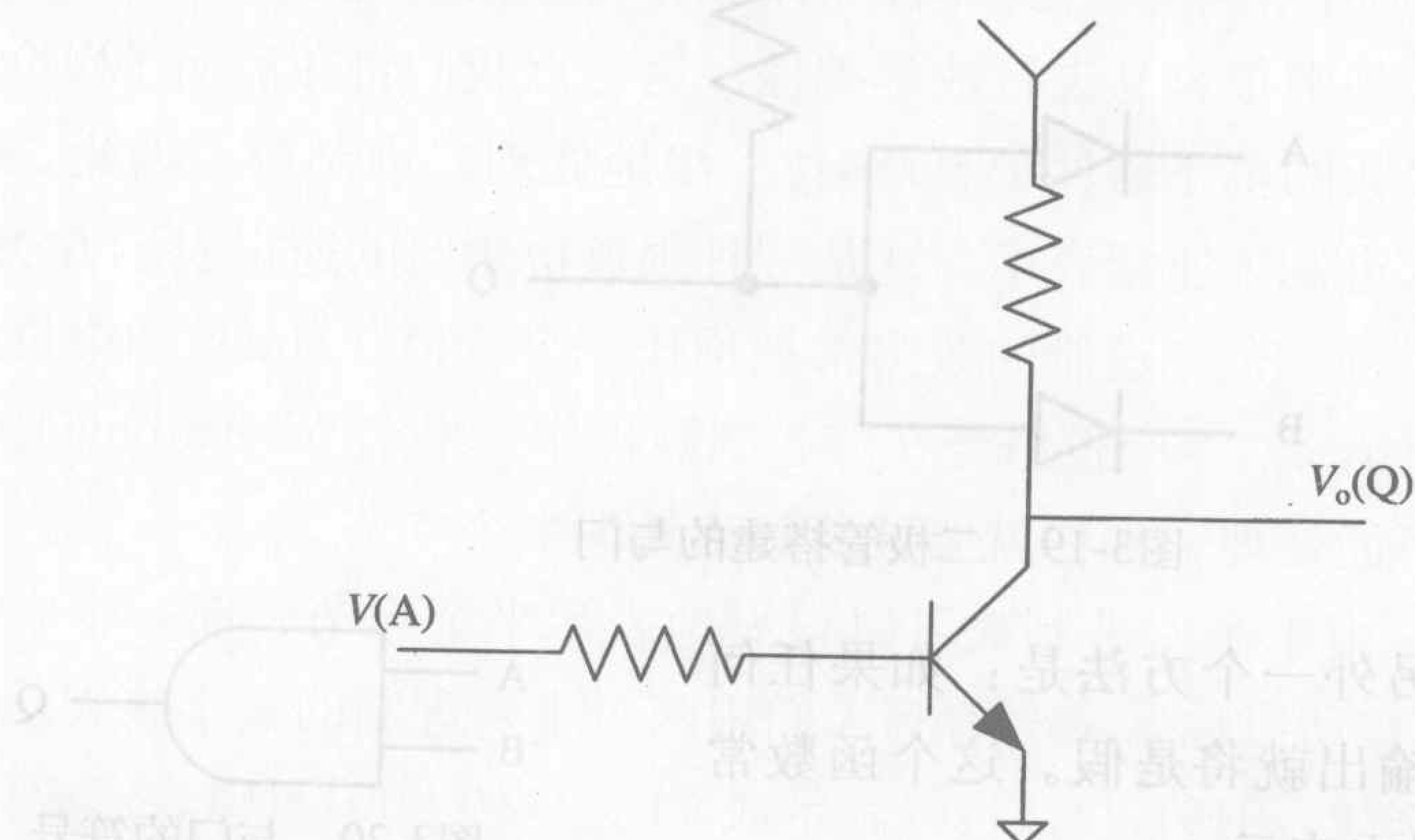


图3-17 晶体管构成的非门

如果你输入0V到这个电路，你将得到5V的输出。如果你输入5V，则将得到几乎[①]为0V的输出。在这个电路中，你已经有效地将逻辑状态反转了。非门也称**反相器**，通常用如图3-18所示的符号来表示。

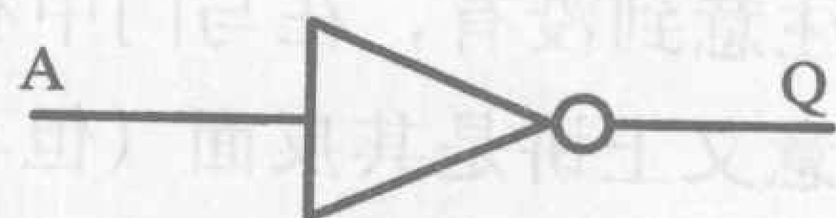


图3-18 反相器或非门的符号

① 请注意，我说的是接近0V。这个电路的输出不会十分接近0V，但这没有关系，因为只要其值小于状态0容许的最大值就行。

以下是其真值表。

输入A	输出Q	输入A	输出Q
1	0	0	1

2. 与（AND）门

"与"函数的运算规则是这样的：只有所有的输入为真或1，输出才能得到真。如果这个也真，那个也真，那么这个"与"那个必然也是真。然而，若任何一个是假，那么输出必将是假。其真值表如下。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	1

我们只需使用一对二极管即可搭建起这个电路（如图3-19所示）。

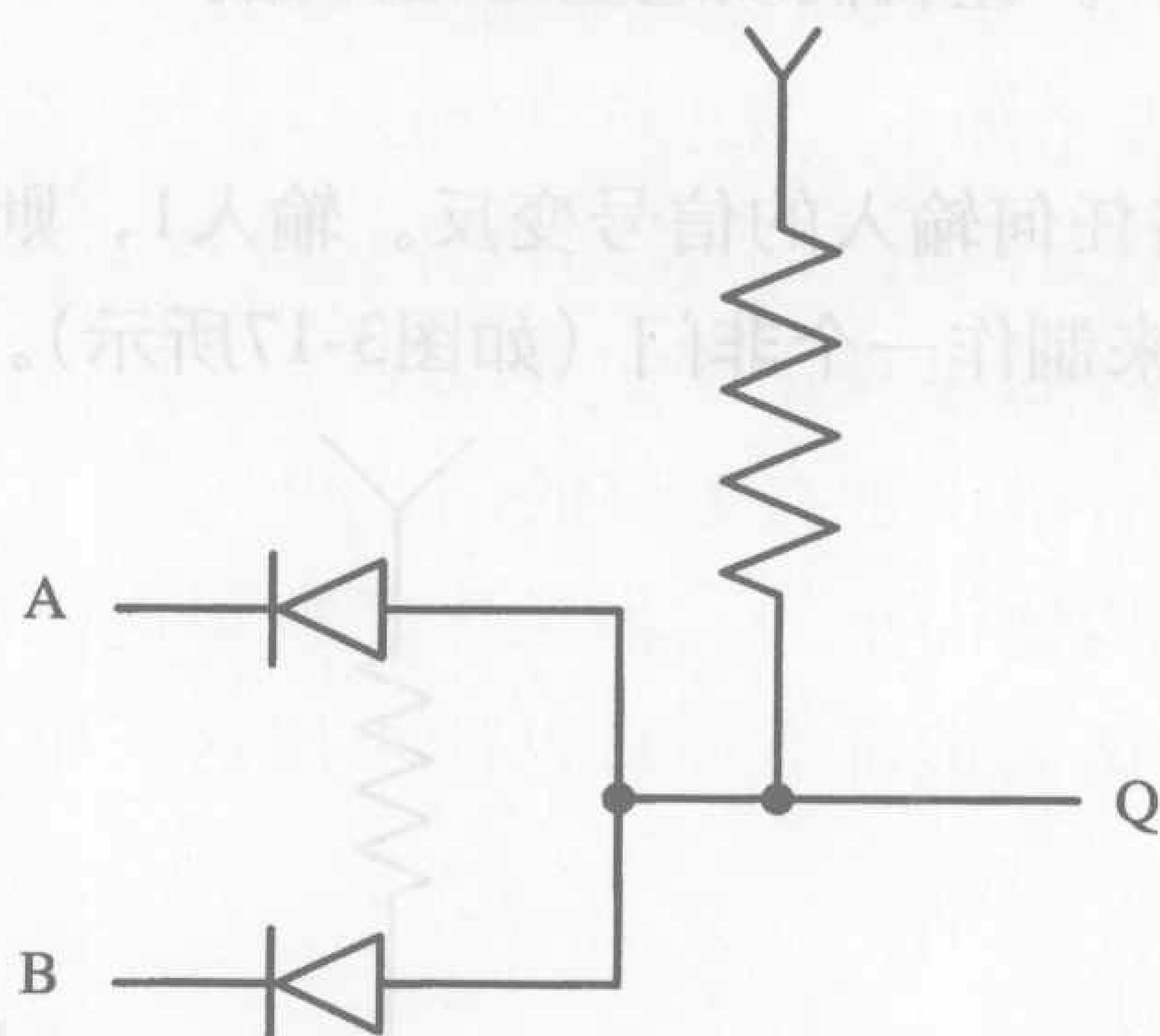


图3-19　二极管搭建的与门

理解这一点的另外一个方法是：如果任何一个输入为假，那输出就将是假。这个函数常用图3-20所示的符号来表示。

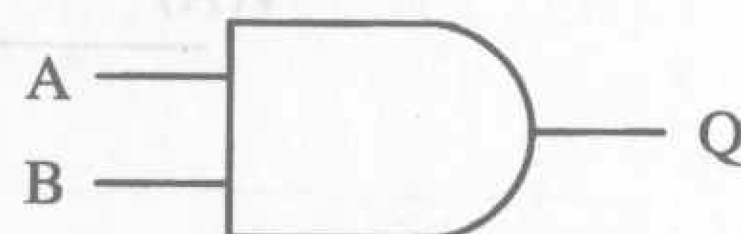


图3-20　与门的符号

3. 或（OR）门

你注意到没有，在与门中有三种输入条件，其对应的输出结果是假或0。或门在某种意义上讲是其反面（但不是正好）。或门有三种条件的输出结果是真，仅有一种条件的结果是假。如果这个是真"或"那个是真，输出结果就是真，即只需一个真的输入就可以产生一个真的输出。其真值表如下。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	0	1	0	1
0	1	1	1	1	1

同样可以用二极管来搭建这个电路，这只需将与门中的元件翻转一下就可以了（如图3-21所示）。

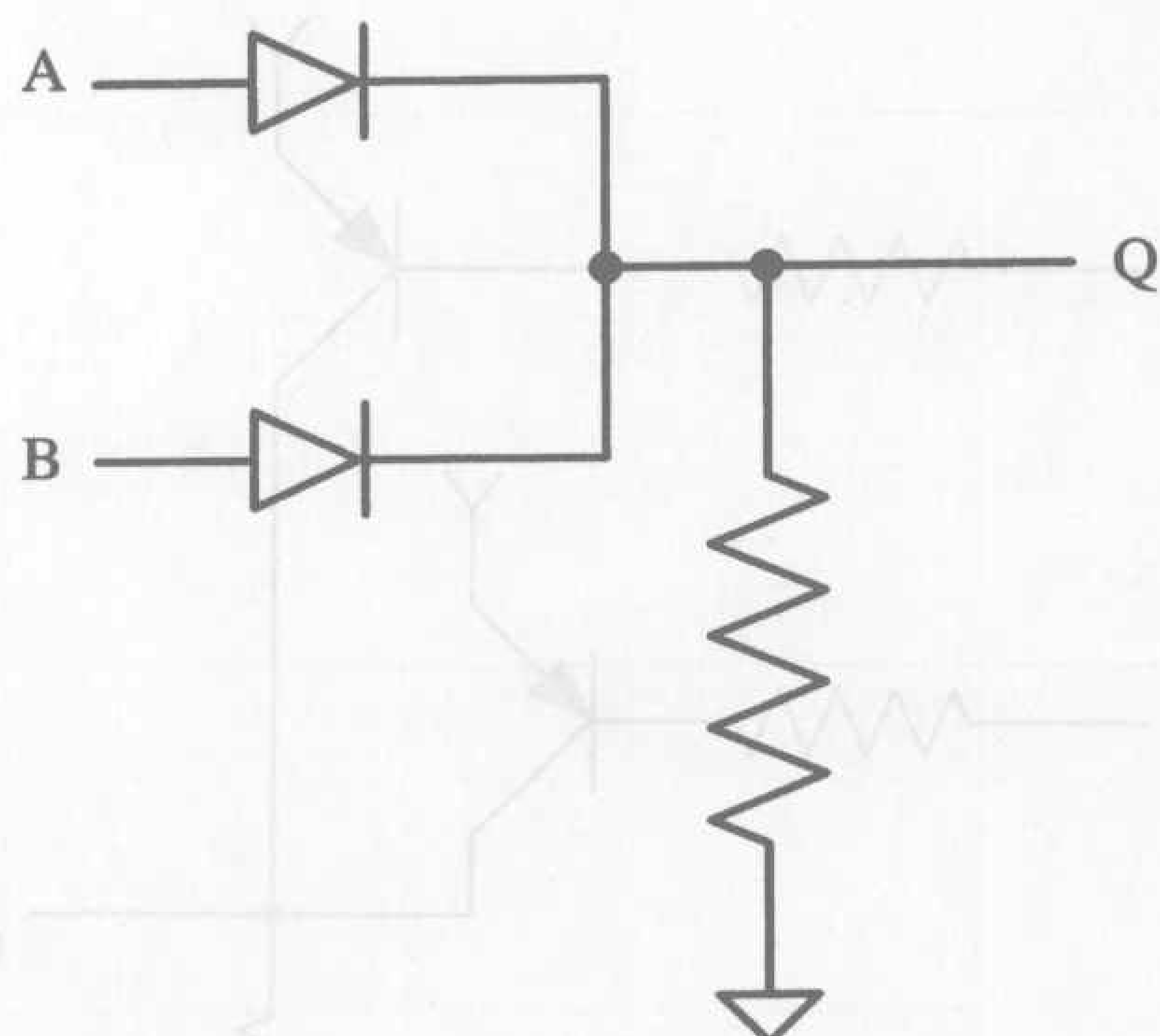


图3-21 二极管搭建的或门

或门较为常用的符号表示如下（如图3-22所示）。

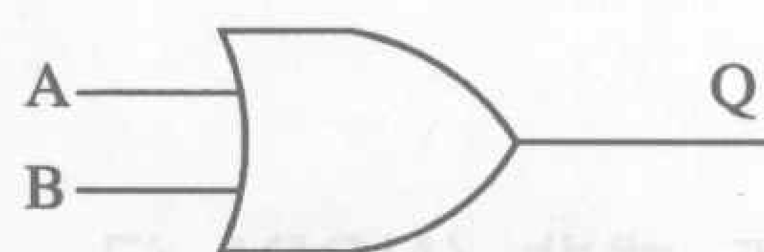


图3-22 或门的符号

以上介绍的是基本的门，只有三个。你也许会说："请等一下，我在逻辑电路的课程中学过更多的门，难道老师教错了吗？"没有错，是有更多的门，但它们都是从这三个基本的门构建而来的。如果你理解了这三个，就可以推衍出其余的。有了这种认识之后，请去试试看你自己能否用这三个基本的门，去构造出其他的逻辑门来。

4. 与非门（NAND）门

NAND（与非门）等于NOT AND（与门结果的求反），字面意义跟其表示的功能是一致的。我们利用非门，把与门的输出变反，就得到了**与非门**。下面是其真值表。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	0

让我们用已经学过的基本的符号来搭建一个与非门（如图3-23所示）。

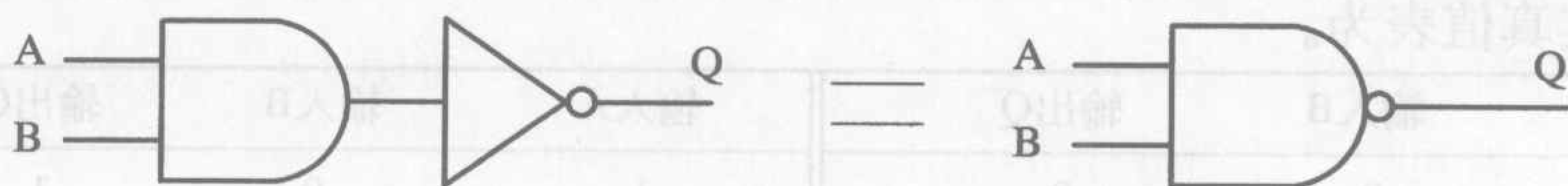


图3-23 与非门的原理

这个门应用很普遍，因此有其自己的表示符号。注意在输出上的小泡泡，它用来指明输出是一个反相的信号。

可以用基本的半导体元件来搭建与非门吗？答案是肯定的。事实上，你只需要两个晶体管（如图3-24所示）。

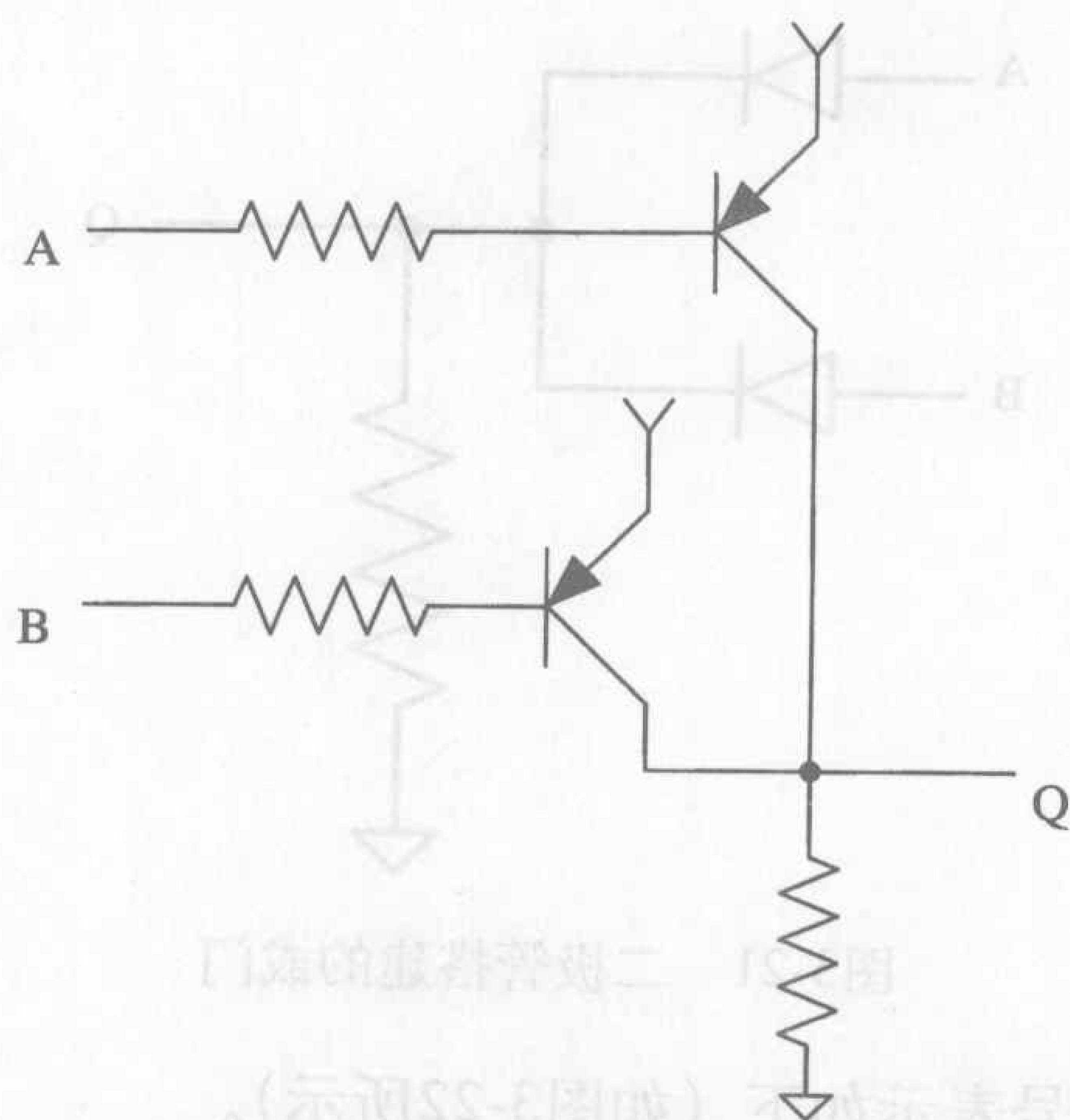


图3-24　简单的晶体管与非门

5. 或非（NOR）门

你一定猜得出它是NOT OR（或非）门。它是通过将或门的输出取反得到的，就跟与非门一样。其真值表为。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	0

或非门是或门取反，其符号是这样的（如图3-25所示）。

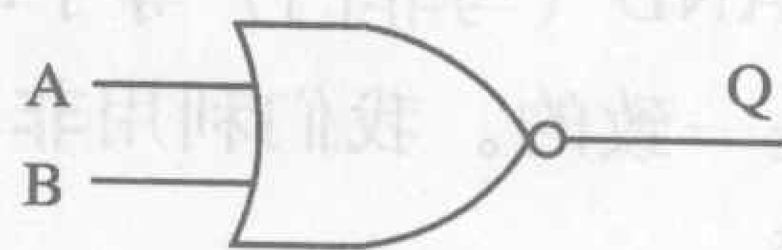


图3-25　或非门的符号

同样，你只需用两个晶体管就可以搭建出或非门的电路（如图3-26所示）。

6. 异或（XOR）门

异或门的符号如图3-27所示异或意味着“排他性的”（exclusive）或。具体来说就是，如果这个是真的或者那个是真的，它就是真的，但要排除两个同时为真的情况。其真值表为。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	0	1	0	1
0	1	1	1	1	0

看看我们能否像搭建其他逻辑电路一样，用基本的半导体器件来搭建异或门（如图3-28所示）。

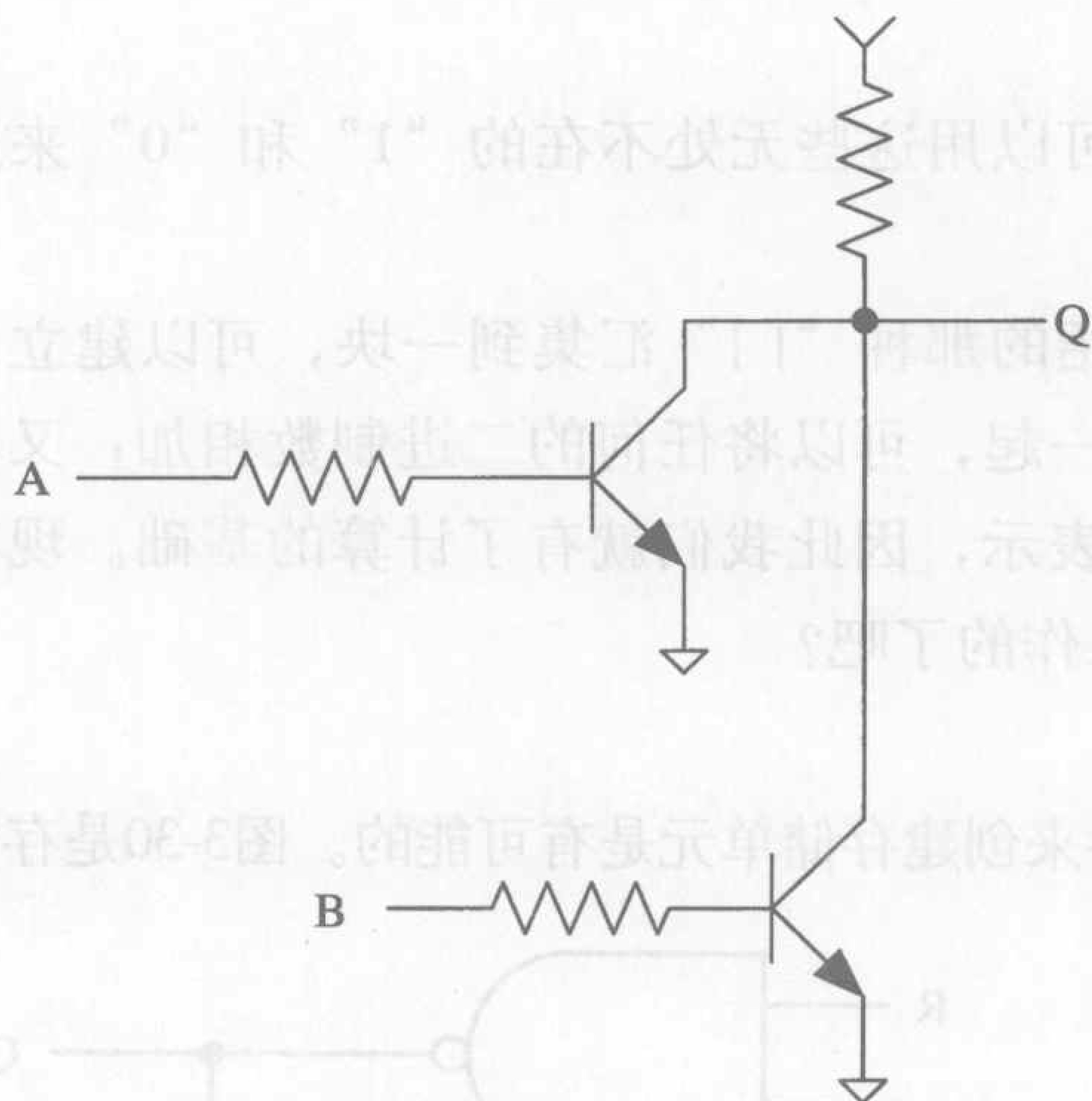


图3-26　晶体管搭建的或非门

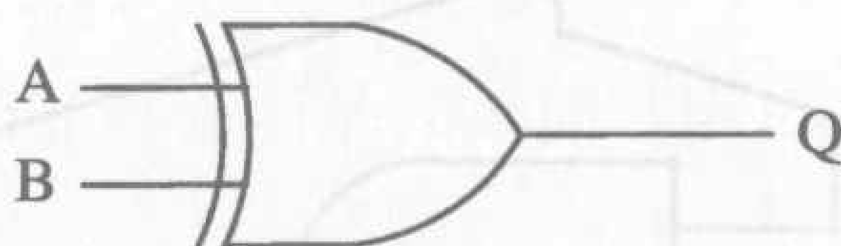


图3-27　异或门的符号

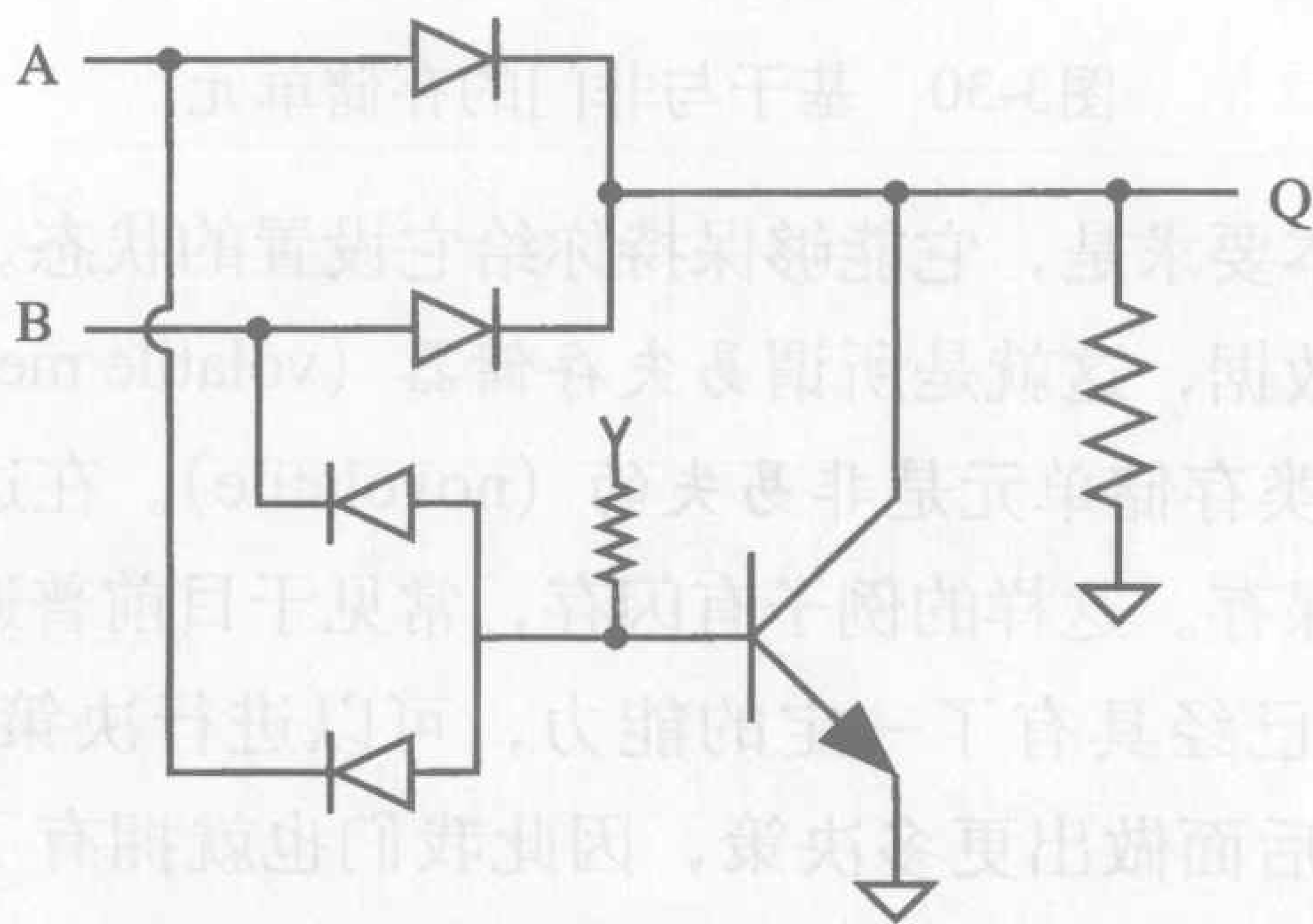


图3-28　基于二极管和晶体管的异或门

7. 异或非（XNOR）门

异或非门的符号如图3-29所示。

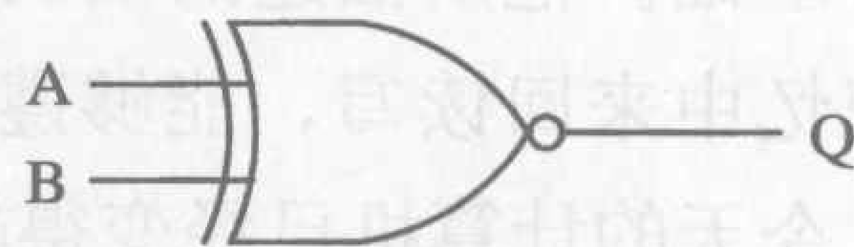


图3-29　异或非门的符号

如果我前面的解释得还算清楚的话，那这个门的功能应该是显而易见的。异或非门是反相输出的异或门。其真值表为。

输入A	输入B	输出Q	输入A	输入B	输出Q
0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1

8. 加法器

如你所知，我们可以用这些无处不在的“1”和“0”来进行计数。计数的逻辑延伸就是数学。

将好几个上面介绍的那种“门”汇集到一块，可以建立二进制加法器；将一长串这种加法器放在一起，可以将任何的二进制数相加；又由于任何的数都可以用一串讨厌的1和0来表示，因此我们就有了计算的基础。现在你开始知道自己桌上的计算器①是如何工作的了吧？

9. 存储单元

采用上面的门器件来创建存储单元是有可能的。图3-30是存储单元的一个原理图。

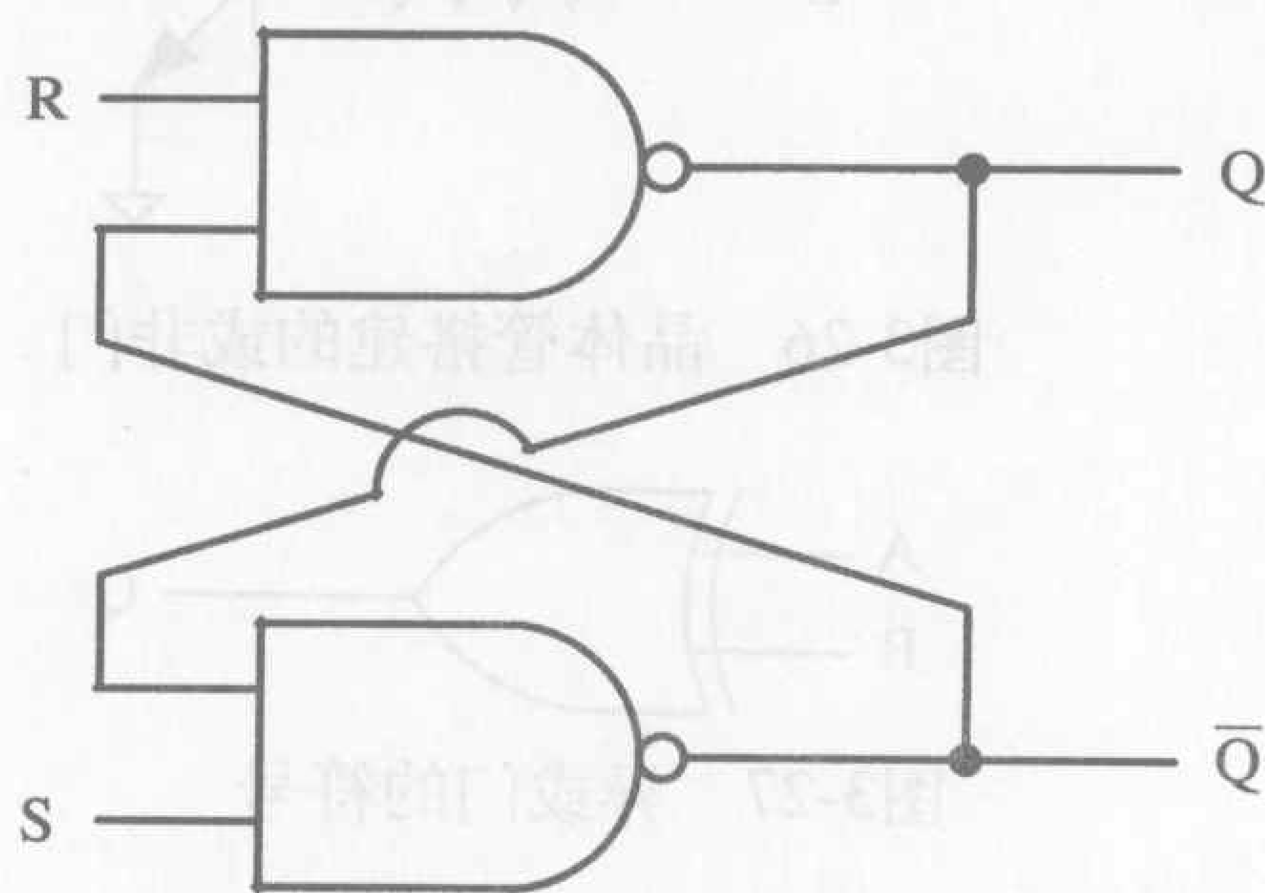


图3-30　基于与非门的存储单元

对存储单元的基本要求是，它能够保持你给它设置的状态。有些存储单元将在掉电时丢失其所存储的数据，这就是所谓*易失存储器*（volatile memory），这跟你计算机中的RAM类似。另一类存储单元是*非易失的*（novolatile）。在这类存储器中，即使掉电了，数据也会得到保存。这样的例子有闪存，常见于目前普遍使用的USB盘中。

到此为止，我们已经具有了一定的能力，可以进行决策、计算数学函数并对结果进行记忆以便在后面做出更多决策，因此我们也就拥有了*图灵计算机*（Turing machine）的基础。Alan Turing是一个密码破译专家，他打下了计算理论的很大一部分基础。他所描述的图灵计算机是这样一种系统，它有无限的记忆容量，能够在记忆中来回读写，能够遵从来自任何地方的指令。除了没有无穷的记忆容量之外，今天的计算机已经变得越来越接近一个图灵计算机了。

从开启一切（数字计算）的简单门电路到超级计算机，甚至于更为复杂的计算系统，都是基于这些简单的逻辑部件的。毫无疑问，在每一个新的超级酷的处

① 从技术上讲，大部分计算器采用一种称之为CORDIC的算法。它能够很好地处理正弦、余弦以及其他的东西，但却仍能保持其电子学上的简单性。尽管技术发展到了今天，但仍然还有一些专为这种桌面电器开发的逻辑器件在完成着所有这类任务。

理器中，都包含着难以计数的晶体管。不过，有一种处于“中间”位置的器件值得一提，这将有助于我们去领会如此简单的一些器件所能产生的复杂世界。这种器件就是*状态机*（state machine）。

3.3.3 状态机

状态机处于离散逻辑与微控制器之间的领地之中。它们通常具有某种类型的一个时钟、存储器，以及微控制器所拥有的大多数基本部件。然而，它们的运行并非需要全部这些部件。

如其名称所暗示的，状态机的输出是任意给定时刻的输入状态的一个函数。通常有某种形式的一个时钟信号，用于确定何时需要对输入信号进行估算。存储单元，也称*触发器*（flip-flop），用于储存信息。当一个时钟信号到达时，触发器将反映该时刻输入的状态。因此，估算所用到的条件可以储存在存储器中。

一个逻辑单元的输入可以在时钟信号的三种不同时间点上进行检测，它们分别是下降沿检测、上升沿检测和电平检测。到底使用哪一种检测方法取决于所用的器件本身，你必须查找各种相关知识的源头——参数表，去进行核实该用哪种检测方法。

这三种检测的名称是其意自明的：分别当时钟信号处于上升沿、下降沿或处于保持电平时，进行数据的评测。由此可见，信号的时间就十分重要。计时的重要性将在我们探讨微控制器时再次出现（微控制器其实只不过是定义了一组指令的大马力状态机而已，但其工作则更依赖于指令）。

由于微控制器的成本不断降低，我相信纯粹的状态机很快就将过时。要是它们还会出现的话，它们通常会以可编程器件（PLD）的形式出现；远离我们而去的只是那些需要将滑溜的D触发器焊接到电路板上、以及需要用电线将电路连接在一起的日子[①]。现在甚至连PLD也有了一个MCU的内核，用以满足通用计算的需要（只要你需要你就可以将其加入）。

总之，布尔逻辑是数字电路的基础。它是一个相对简单的概念，但却可以完成十分复杂的事情。现在的世界显然越来越数字化了，你还记得自己在市面上最后一次看到单纯采用“模拟”技术的小饰品是什么时候吗？

经验法则

- 在二进制中，每一位的1表示的数值都是上一位的1所表示的数值的两倍。
- “位”是数字信息的最小单位，它只有两种状态，1或者0。

---

① 你是否注意到你年纪越大，就越容易进入一种愉快的回忆状态？进化出这种能力到底有什么好处呢？

- 4位是半个字节，8位是一个字节。
- 1是真，0是假。
- 永远要查真值表。
- 在电路的某个点上，一个信号要么是1，要么是0，具体取决于元件的阈值。
- 在建立复杂的逻辑电路时，时序十分重要。

3.4 微处理器/微控制器基础

这是电子工业中发展最迅速的一个领域。目前，你只需要花25美分，就可以买到仅有6个引脚和几行存储器的微控制器。你也可以仅花几个美元，即买到在几年以前还被归类为超级计算产品的高端嵌入式处理器。所有这些器件都是由前面我们已经介绍过的几种半导体类型构成的。我不想具体去介绍某款处理器，因为已经有大量的书籍可供大家去学习任何特定的一款微处理器。相反，我将试图去介绍一些通用的基本原则。

将大量的逻辑门加在一块，辅之以一些加法器、指令解码器以及存储单元，再接上输入、输出引脚，加上一个时钟源，你就做出了一个微控制器或微处理器。微控制器、微处理器这两种器件是十分相似的，这两个名称在某种程度上可以互换使用。然而，一般来讲，微控制器所包含的功能会更全面一些，它把自己运行所需的所有元件都包含在了一个硅片之中，这往往使得它的应用要稍微专一一些（但并非过分专一）。相反，微处理器则需要依靠外部的存储器和接口设备来运行。这使得它更具扩展性，例如可以对存储器进行升级而无需更换芯片。由于技术的进步，这两种器件之间的界线已变得相当模糊。因此许多的设计理念对于它们来讲都是相同的。下面用微控制器（micro）来作为它们的统称。

3.4.1 微控制器原理

如果我说微控制器内部的所有部件都是晶体管，那你可能会觉得奇怪。但事实就是如此，正是晶体管构成了门电路，门电路构成了逻辑机！下面就让我们来看看微控制器中的部件。

1. 指令存储器

我喜欢将其称为ROM或只读存储器（不过如今的许多微控制器可以对自己的指令存储器进行写操作）。它们可以是可编程存储器、硬代码、闪存，甚至可以是由内核来读取指令的外部芯片。指令被储存成数据位，它是用0和1构成的字节来表示的。

2. 数据总线

数据总线是微控制器的“脊椎”，是微控制器的不同部件之间进行内部连接的

通道。实际上，在微控制器中发生的几乎所有事情都将在某处通过数据总线。

3. 指令解码器

指令解码器是逻辑电路的一种，它对送到它面前的指令进行解释，使相应的任务得以完成。

4. 寄存器

寄存器是储存数据的地方，从字面上理解，它就是我们前面讨论过的存储单元，相当于微控制器内部的RAM。它是用来处理数据的片上存储器（scratch pad）。在某些情况下，也可以从外部芯片去对其进行访问。

5. 累加器

累加器是一种特殊的寄存器，它通常直接连到算术逻辑单元（ALU）。当对累加器中的一个数据进行数学函数运算时，结果将留在累加器中，因此它将累积数据。在很多较新的微控制器中，几乎所有的寄存器都可以像累加器一样工作。

6. 算术逻辑单元（ALU）

算术逻辑单元是用来对数据进行各种算术运算和逻辑运算的部分。

7. 程序计数器

程序计数器指明微控制器到底处理到了指令的什么位置。如果将每片存储单元看成有编号的一片纸，那么程序计数器就保留着纸片上的那个编号。它指明目前微控制器在哪片纸上。

8. 定时器

在创建具有代码运行其中的结构时，定时器十分有用。定时器有时也称为实时时钟计数器（real-time clock counter，RTCC）。它们通常依靠独立的时钟源进行计数。有时，还将它们接到外部的时钟源或输入上。工作时，它们按照你给它们设定的任何时间间隔"滴答滴答"地计数，不受任何干扰。通常，通过对它们进行设置，可以使其在一个预置的时间点产生中断。

9. 中断

严格来讲，中断并不是微控制器的一种具体的硬件，但它是如此的重要，因此值得一提。中断是一种监控电路，一旦被触发，它将使微控制器停止目前的工作而去执行与中断有关的一段代码。这些触发信号可以由内部的条件或来自外部的输入产生。通常只有某些引脚具有驱动中断的能力。

10. 助记符和汇编程序

跟机器不同，人类很难记住无休无止的二进制数据流。即使想记住一个微控制器的全部十六进制代码都十分困难。因此人们发明了助记符。助记符其实就是用来代表储存于指令存储器中的实际二进制数据的代码或单词。

汇编程序则负责将这些助记符转换成实际的数据，并产生一个文件，然后将其复制到指令存储器中。

你也许为计算机写过代码，它需要用编译器来进行编译。但汇编程序与编译器有些不同。编译器读取的是代码语言，譬如C语言，产生的代码供在计算机上运行。编译器将帮助你处理存储器寻址之类的工作，而无需你自己费心，这跟汇编程序完全不同。这就是C语言等被称为高级语言的原因。汇编语言则不同，它需要直接与芯片所连的硬件打交道。

现在已经有很多微控制器拥有C汇编器，这样你可以使用自己熟悉的语言来为微控制器编写代码。然而，使用这个方法时必须格外小心，它可能会使效率大打折扣。我有一个应用实例，是用一个有4k字节存储器的微控制器来控制一个电动牙刷。一开始采用C语言进行编程，结果开发者老是跑来要求给微控制器增加更多的存储器，因为他没有办法装下自己的代码。在改用汇编语言以后，所有的指令只用了大约500个字节。这是一个极端的例子，我相信采用C编程并获得高效设计的例子肯定会更多。不过不管怎样，你都应该对自己写出的代码心中有数。

3.4.2　结构

组织代码的方法多得不计其数。其中有些基本的方法和思路，是我在初次动手开发微控制器应用产品的时候，特别希望学校里曾教授过的。

大多数微控制器每次只能做一件事情。当它们做事很快时，它们可以表现得像能够同时做多件事，但事实是，每个具体的指令只能完成一件事情。这意味着定时结构对设计的效率有着巨大的影响。

考虑一个简单的问题。你有一个设计，其中你需要每秒钟对输入引脚进行一次检查。实现这个要求的一个方法如下（注意用的是我Darren的代码，一种强大而凭直觉的编码工具。不过很遗憾的是，它不能在任何已知的微控制器上运行☹）。

```
Initialization
Clear counters
Setup I/O

Sense input
    Read pin
    Store reading

Delay loop
    Do nothing for 1 microsecond
    Jump to Delay loop 100000 times
Delay done

    Jump to Sense input
```

你可能已经注意到了，这个方法存在一个小问题。处理器把所有的时间用来等待下一次输入，其间不做任何事情。如果你不需要芯片做其他任何事情的话，那这没有什么问题。然而，如果你想充分利用你的微控制器的话，那你就必须找出一种方法，以在等待期间做其他的事情，并在正确的时刻返回来处理输入。这样做的最好方法是采用定时中断。

中断本身的含义不言自明。想像你有一个助手，你让他盯着一个闹钟，并在下午5:00提醒你去参加一个重要会议。当你正在努力工作的时候，你的助手来了，他中断（interrupt）你的工作，告诉你是参加会议的时间了。现在假设你像这些芯片一样准时，你放下手中正在做的任何工作，跑去参加那个会议，并在你开完会之后，马上跑回来干你原来的工作。用微控制器的术语来讲，这就是为中断提供服务。

大多数微控制器有一个按照主时钟运转的定时器，它可以被设置成每隔固定的时间就触发一次中断。让我们用定时中断的方法来解决前面的问题，它是如下的样子。

```
Initialization
Setup Timer Interrupt to trigger every 1 microsecond
Clear counters
Setup I/O

Main loop
    Calculate really fast stuff
Tenth second loop
    Check tenth second flag
    Jump to End tenth if not set
    Do more tasks
    Call some routines
End tenth
Second loop
    Check second flag
    Jump to End second if not set
    Read pin
    Store reading
End second
    Jump to Main loop
Timer Interrupt
    Increment microsecond counter
    If microsecond count equals 10000
        set tenth second flag
        increment tenth counter
        clear microsecond count
    Else clear microsecond flag
```

```
    If tenth count equals 10
        set second flag
        clear tenth count
end interrupt
```

有一点需要注意的是，你不应该在中断里做太多的事情。如果在其中放入太多的事情去做，你会遇到溢出的问题，也就是说，你会遇到太多的中断需要处理，因而没法完成任何事情。我相信你一定遇到过一两个老板，他们已经让你领教了"溢出"问题的真正含义。在上面的Darren代码中，需要在中断里完成的唯一事情就是让计数器计数并设置标志。所有需要依时间基准去完成的事情，则都放在主循环里，当发现相应的标志被置位时进行处理。

这样一来，就出现了一件很酷的事情。我们有了这样一种结构，它可以在需要的时候读取输入，但却仍然有时间去做其他的事情，譬如分析输入的含义、判断需要对其进行什么处理等等。这个结构就是一个原始的操作系统。对我来讲，我喜欢称其为DarrenOS。以后在你开发微控制器的定时代码时，也大胆一点，把你的名字放在大写字母O与S的前面，作为其名称。（这里插入你的名字）OS是个自由王国，我保准不会有任何间谍软件能侵扰它！

在我看来，上面这类结构的最大问题在于，它增加了复杂度，工作原理的理解变得更加困难了。前面的第一个代码实例很直截了当，而当你读第二个代码实例时，你就会发现它有点难于理解。这会很容易在你的代码中产生漏洞，因为代码的设计逻辑更难理解了。如果你无需做任何其他的事情，那第一个代码实例没有任何错误。然而第二个代码实例的定时结构终究要灵活得多、强大得多。我们需要在简单性、代码复杂性以及充分利用微控制器能力等方面进行取舍或折中。

一些有一定编程经验的读者也许会说："为什么不直接把你需要检查的输入引脚信号作为一个中断，并且只在它改变的时候进行检查呢？"这是一个很好的问题。有些时候，采用这种中断驱动的I/O方法显然是必需的，譬如在需要对这个输入做出快速响应的时候。然而，对任何微控制器来讲，都只有有限的几个中断可供使用。如果每个I/O引脚都采用中断方式，你很快就会发现中断不够用。此外，与外界相连的引脚上有时会出现噪声或信号反射，而定时结构对它们有过滤作用，这也是定时结构的好处之一。

3.4.3　算法程序

写个能够完成乘法或除法运算的程序并不很难，但要写出很好的乘法或除法程序却很困难。好程序的一些特征包括：精短、简明、可靠，使用尽可能少的存储器。

我曾经询问过一些学生及专业人士，问他们将会如何去实现乘法和除法的程

序（请记住，在这些高性价比的小小微控制器中，你只能使用加法、减法和其他一些基本的编程命令）。工程师们最常想到的是同一个方法，也是我第一次解决这个问题时所用的方法。下面举例说明。

求两个数乘积A × B的程序：

```
1.Result = 0
2.If(B = 0) Then Exit
3.Result = Result + A
4.B = B - 1
5.If(B = 0) Then Exit Else GOTO 3
```

求两个数相除A/B的程序①：

```
1.Result = 0
2.Remainder = A
3.If(B < A) Then Exit
4.Remainder = Remainder - B
5.Result = Result + 1
6.GOTO 3
```

这些程序能够工作并且也有它们的优点：它们使用的RAM或代码空间极少，并且它们很直接、很容易理解。然而它们有一个显著的缺点，就是需要很长的执行时间。

对于上面的乘法程序，若B为3这样的“小”数，那么程序将执行得很快，而若B为5 000这样的“大”数，则将耗费很长很长的时间。就上面的除法程序来讲，当A与B的比值很大时，也会遇到同样的问题。每一个整天都泡在位与字节的世界里，一心想从中挤出性能的人都知道，这些程序是不可接受的。这样的程序会让你把自己的时间都消耗在寻找芯片无故复位的原因上，因为在处理一个很大的数的时候，看门狗（watchdog）定时器会超时，从而触发复位中断。

幸运的是，另外有一个好算法。别人曾给我看过这个算法，现在我再把它作为有用的工具传给你们。它不是什么大秘密，你只需跳出老旧的十进制世界，像计算机那样思考就行了。

二进制世界的一个优点值得再提一次：当你将一个数左移一位时，你就将这个数乘上了2，如果你将一个数往右移一位，你就将这个数除以了2。不太难理解，是吧？这一切只不过是模仿了我们从小就熟悉的十进制世界中的一条类似的规则：左移1位是乘以10，右移1位是除以10。

利用这个简单的规则，并配合加法与减法，我们就可以写出很好的乘法和除法

① 程序第3行的“B<A”应为“B>Remainder”。——译者注

程序，它们具有精确、可扩展、使用很少的代码或RAM的优点，并且对于所有的数值，其花费的时钟周期都差不多。为了简单，我下面提供的程序针对的是字节数据，但同样的模式可以用于任何长度的操作数（此时你只需扩展寄存器的空间）。

1. 乘法

从两个数的乘法A×B开始。作为例子，假定A＝11，B＝5。在二进制中，A＝00001011，B＝00000101。

在我们把两个只有1字节的数相乘时，我们知道结果总在2字节以内。因此，以下的RESULT是“字”大小的，TEMP也是“字”大小的，而COUNT则只需一个字节的长度。

```
1. RESULT = 0                          ；这是最终结果存放的位置
2. TEMP = A                            ；需要一个字长的数，做移位用
3. COUNT = 8                           ；因为我们乘以的是一个8位的数
4. Shift B right through carry         ；查看最低位是否为1
5. If(carry = 1) then RESULT = RESULT + TEMP
6. TEMP = TEMP + TEMP                  ；将TEMP乘2，为下次循环做准备
7. COUNT = COUNT - 1
8. If(COUNTER = 0) then exit else GOTO 4
```

下面来看该程序的原理。在循环中，当每次将B通过进位标志朝右移动一位时，在本质上相当于我们在B里的检查位朝左移一位，目的是检查B在该处是1还是0（记住，左移相当于乘以2）。与此同时，我们每次也将TEMP左移一次，这是因为我们在B里面检查的二进制位的权值是上一个位置的2倍。接下来的事情就是，如果检查到B里面的位是“1”，就将TEMP加到RESULT里，如果B里面是“0”，就不加。当COUNT＝0时，我们就得到了最后的结果，它在RESULT中。不论你的数是多大，该循环都一样地工作。这个子程序不仅花费的机器时钟周期很少，而且相当紧凑，使用了最少的RAM。

现在来看我们的具体例子，其每一步的数据如下（其中x表示不用管）。

循环次数	RESULT	B	TEMP	COUNT
1	00000000 00001011	x0000010	00000000 00010110	7
2	00000000 00001011	xx000001	0000000 00101100	6
3	00000000 00110111	xxx00000	0000000 01011000	5
4	00000000 00110111	xxxx0000	0000000 10110000	4
5	00000000 00110111	xxxxx000	00000001 01100000	3
6	00000000 00110111	xxxxxx00	00000010 11000000	2
7	00000000 00110111	xxxxxxx0	00000101 10000000	1
8	00000000 00110111	xxxxxxxx	00001011 00000000	0

2. 除法

乘法搞清楚后，除法就是乘法的相反过程。让我们以A＝102，B＝20为例，求A/B。

在二进制中，A＝01100110，B＝00010100。

由于我们处理的是整数，因此知道A/B的结果RESULT小于或等于A。所以RESULT为一个字节，REMAINDER为一个字节，TEMP为两个字节。

```
1. RESULT = 0                          ；这是存放结果的位置
2. REMAINDER = 0                       ；这是存放余数的位置
3. COUNT = 8                           ；这是因为被除数是8位的
4. RESULT = RESULT + RESULT
5. Shift A left through carry
6. Shift REMAINDER left through carry
7. IfREMAINDER >= B then RESULT = RESULT + 1 and REMAINDER =
   REMAINDER - B
8. COUNT = COUNT - 1
9. If(COUNTER = 0) then exit else GOTO 4
```

可能这个程序看起来有点难懂，但程序的算法确实跟我们从小所学的除法是同样的除法。请你注意观察一下，看A的顶部（即A中左移到REMAINER里面的部分）必须有多少位的时候，才能从其中除掉一个B。一旦在REMAINER里面出现了一个大于或等于B的数，我们就从中减去被除数B，然后继续。请利用我所给的具体数据，从头到尾读一遍程序，看看能否搞清楚。

对于我们的具体例子，其每一步的数据如下（其中x表示不用管）。

循环次数	A	RESULT	REMAINDER	COUNT
1	1100110x	00000000	00000000	7
2	100110xx	00000000	00000001	6
3	00110xxx	00000000	00000011	5
4	0110xxxx	00000000	00000110	4
5	110xxxxx	00000000	00001100	3
6	10xxxxxx	00000001	00000101	2
7	0xxxxxxx	00000010	00001011	1
8	xxxxxxxx	00000101	00000010	0

一步步仔细看看，我们的程序确实能够工作吧！

做事的方法总有多种，我从来不敢说上面的这些程序对于所有的情况都是最好的。然而它们十分灵活、且易于使用。可以很容易地对它们进行修改，以适应16位、32位、64位，甚至于更高位的情况。

这两个程序的运行时间取决于操作数的位数，而跟操作数的实际大小无关。这可以使程序的运行时间基本一致，这个特征十分必要。

3.4.4　关于I/O（输入或输出）的注意事项

在微控制器的参数表中，介绍I/O引脚的那几页很重要。关于你自己所用的微控制器的I/O，有一些很简单的问题你应该能够回答。譬如输出能够提供多大的电流，能够吸收多大的电流，等等。

我常常遇到这种情况：由于微控制器没能按照我的设想工作，因而使我不得不在代码中折腾来折腾去，试图找出问题的所在，但最终却发现问题仅仅在于我没有搞懂I/O引脚的限制。不要总假定所有的I/O都是一样的！

了解你的I/O，弄明白它是如何工作的，这将使你拥有更多极其有用的编程资源。在嵌入式编程的世界里，正是这些东西“把男人同男孩区分开”[①]的。

对于输入引脚，你应该知道的有：

(1) 输入阻抗是多少？

(2) 是否有内部上拉或下拉电阻？

(3) 从信号出现在引脚上到可以由引脚读入信号这两者之间需要多长的时间？

(4) 如何将引脚设置为输入状态？

后面的两个问题看似有点古怪。但我曾经用过一个微控制器，它的一个输入引脚只有在你往输出口写一个高电平时才会成为输入引脚。如果你往输出口写一个低电平，它就成为一个输出引脚。它是一种很古怪的漏极开路型的I/O组合。

对于输出引脚，你应该知道的有：

(1) 输出阻抗是多少？

(2) 它能够吸收的电流是多少？

(3) 它能够供给的电流是多少？

(4) 在带负载的情况下，它需要多长的时间来改变状态？

(5) 如何将引脚配置成一个输出？

你注意到了定时的问题了吗？定时是特别重要的，当访问外部存储器之类的器件时尤其如此。你需要知道使信号输出到微控制器外部需要多长时间，使微控制器收到一个外部信号需要多长时间。如果你的设计存在时序的问题，那么尽管它可能会在几台样机上运行得十分出色，但当进入批量生产以后，就可能在一定百分比的产品中出现各种古怪的行为。

---

① 或“把女人同女孩区分开”。在今天的世界里，即使在你使用委婉说法的时候，你也得保证在政治上是正确的。

总之，明白你的I/O能够做什么、不能够做什么是十分重要的。

3.4.5 以简单模块为起点

有许多时候，我曾看到工程师（也包括我自己）会花上数小时甚至数天的时间为微控制器编写代码，结果却看不到微控制器有任何反应。这时你会摆弄一些导线、检查一下电源，然而却仍然看不到动静。这时你应该怎么办呢？

有时最好的办法，就是先试图让最简单的操作能够运行——例如使一个LED每秒钟开关一次。如果你使用的是我们前面讨论过的定时结构，那么让一个LED闪烁可以证实好几样事情。你将知道你的时钟是好的，你将知道你的中断是运行的，你将知道你的定时结构是在工作的。如果你没有可供闪烁的LED，那么你可以把一个电压表或一个示波器接在一个输出引脚上，并周期性地改变这个信号。

一旦你已经能够按照自己的意志来开关这个LED，你就可以开始在这些代码的基础上，一步一步地加入完成特定任务所需的越来越复杂的程序。这个经验的启发就是："不要试图让你的所有代码立即就能全部工作！"先试着做一些简单的操作（可以做一些简单得甚至都未被列在功能说明中的操作）。一旦你能够使其完成一些简单的事情，更复杂的事情就将变得更容易实现。对一个LED的代码结构问题进行调试，要比对一个32位的DRAM数据接口的代码进行调试要简单得多！

经验法则

- 理解微控制器的主要部件。
- 有时应用较低级的语言进行编程更好。
- 建立定时结构是挖掘微控制器潜力的一种方法。
- 不要害怕使用Darren代码或DarrenOS，你甚至可以创建你自己的代码和OS，以帮助你对所要编程的事情获得更好的理解。
- 熟悉你的I/O。
- 从开关单个LED开始你的代码。
- 拥有一个精明的用二进制思考的兄弟[①]。
- 先用你的代码做简单的事情。

---

① 关于算法程序的那部分内容，节选自我兄弟Robert Ashby在几年前写的一篇文章（经作者授权）。这些程序相当精炼，是不是？他写有一本关于Cypress PSoC微处理机的书，如果你使用这种芯片，我强烈推荐该书。除了设计这个芯片的那些人之外，在我所认识的人中，就数我的兄弟最熟悉这个芯片的I/O了。他写的书是：*Designer's Guide to the Cypress PSoC*（Elsevier, 2005）。

3.5　输入和输出

3.5.1　输入

正如电影《短路（Short Circuit)》中的机器人一样，你设计的所有电路也都需要输入。因此，对一些常用的输入设备做个简单的介绍是恰当的。有几种方法可以得到这类输入。

一个办法是通过中断。你可以将信号接在一个可以产生中断的引脚上。当其中断时，微控制器将决定应该对它做些什么，然后再继续运行其他程序。这个办法的优点是可以立即得到微控制器的响应。

监控一根输入线的另一个办法是采用一种称为“轮询”（polling）的方法。轮询的工作原理跟烦人的电话推销员[①]的所作所为相同。是由他们决定什么时候来打你的电话及问你问题。同样，是由微控制器决定何时去检查一个引脚并查看引脚的信息。

第三个办法就是采集一个模拟量的读数。这个方法已经越来越常用，即使在最小的微控制器中也是如此。这本质上是一种轮询机制，你需要告诉A/D转换器何时采集读数。不过，在引脚可以被设置成比较器的一些情况下，可以用比较的结果来驱动一个中断。把这些知识记在心里，我们就可以去了解一些常用的输入设备了。

1. 开关

开关可能要算我们遇到的最基本的输入设备了。开关在闭合时具有低阻抗，而在断开时则不与任何东西相连，是一种理想的高阻抗连接。了解这一点十分重要，因为当你把开关连接到一个高阻抗端口时，若开关断开了，则是一个高阻抗[②]连到另一个高阻抗。这个方法肯定可以得到超凡的结果。因为阻抗越高，断开一个信号就越容易。要想同这个方法一较高下，就得使用上拉电阻或下拉电阻（如图3-31、图3-32所示）。

一般来讲，对开关输入进行轮询的做法要比让其触发一个中断的做法好。其中的原因在于一种称为开关反弹（switch bounce）的现象。作为机械装置，开关内部有两个可以互相接触的触点。在开关闭合的瞬间，触点在达到始终闭合的状态之前可能会因撞击而开合多次。因此触点实际上会反弹好几次，输入到微控制器的信号如图3-33所示。

---

① 这里假定他们是微控制器。如果你是微控制器的话，那他们就是中断。
② 当你看到“高阻抗”一词时，请注意它对DC和AC信号都是高阻抗。

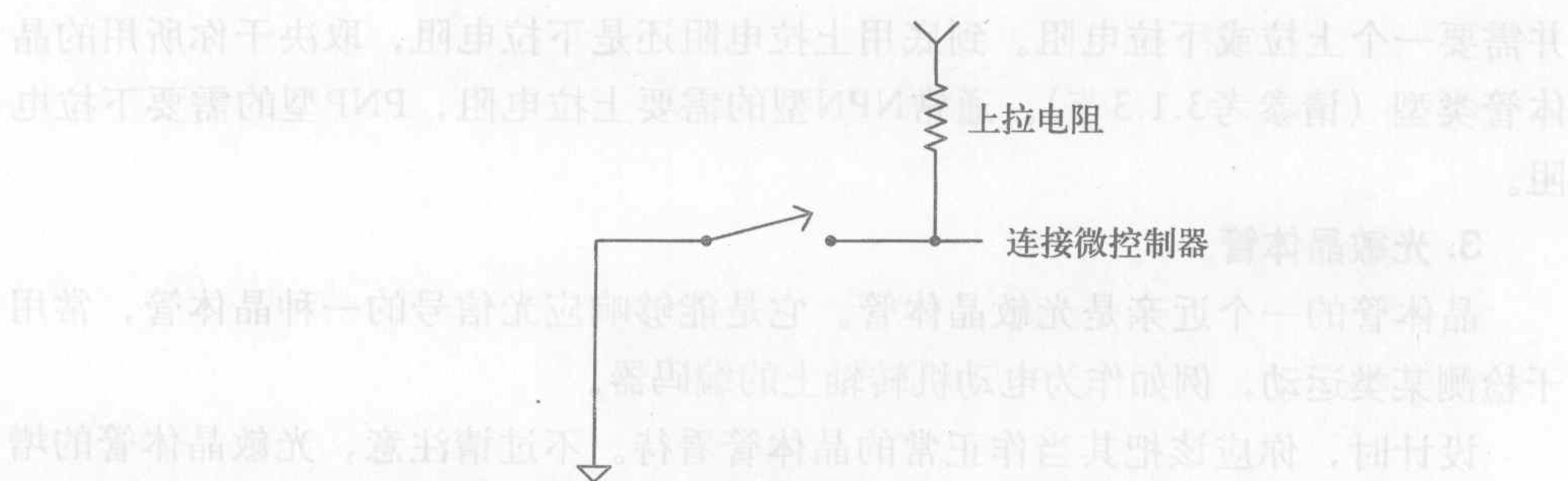


图3-31 拥有上拉电阻的开关

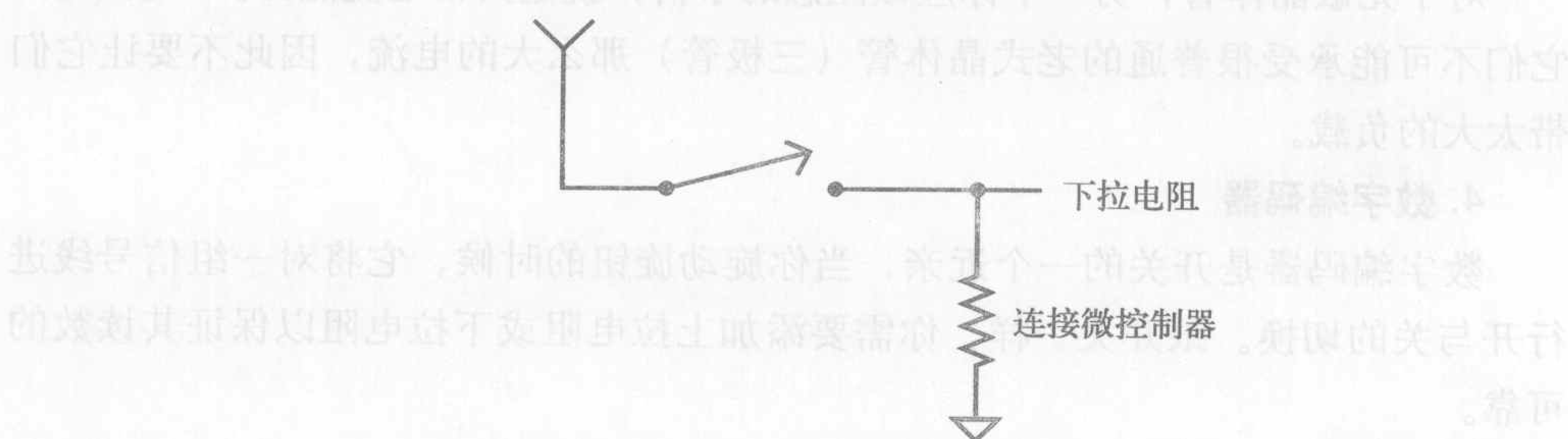


图3-32 拥有下拉电阻的开关

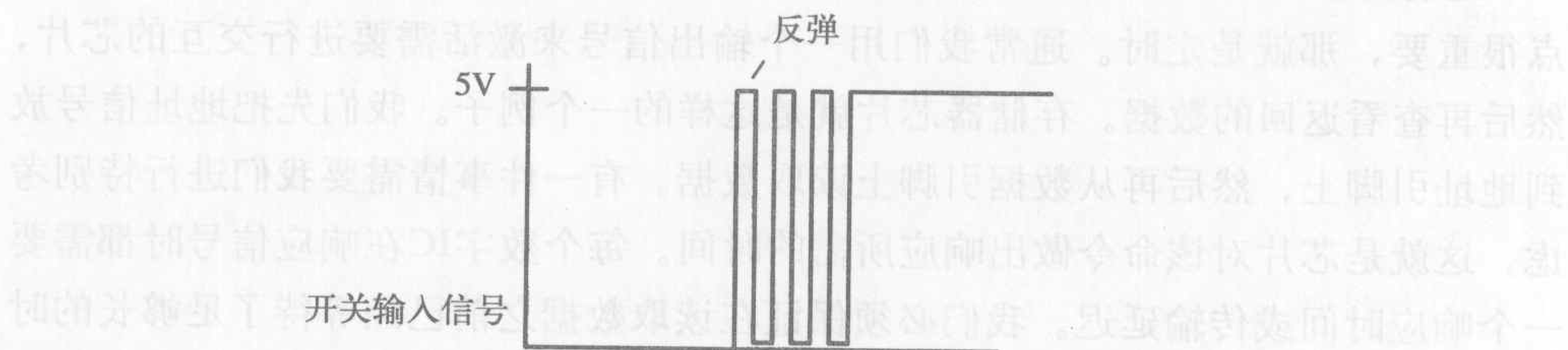


图3-33 开关反弹时，信号线上的信号

如果这是一个由中断驱动的系统，你应该明白会发生什么。每次信号变高，都会在微控制器上触发一次中断！在你原本只希望通过开关的闭合来实现单次中断的时候，你可能会触发5、6次的中断。而如果你采用轮询的方式，那你可以先确定出反弹的频率，通过选用比反弹频率低的检查频率，基本上可以避免这个问题。另一个增加可靠性的办法，就是要求连续两次轮询都得到闭合信号以后，才认为开关是闭合的。这将使脉冲干扰和噪声很难混进有效的输入之中。

2. 晶体管

由于晶体管使用极其普遍，因此你可能时不时需要把晶体管作为输入设备，并为其建立接口。跟开关一样，晶体管在闭合时是低阻抗，在断开时是高阻抗，

并需要一个上拉或下拉电阻。到底用上拉电阻还是下拉电阻，取决于你所用的晶体管类型（请参考3.1.3节）。通常NPN型的需要上拉电阻，PNP型的需要下拉电阻。

3. 光敏晶体管

晶体管的一个近亲是光敏晶体管。它是能够响应光信号的一种晶体管，常用于检测某类运动，例如作为电动机转轴上的编码器。

设计时，你应该把其当作正常的晶体管看待。不过请注意，光敏晶体管的增益或β的变化要比普通晶体管的大得多。在你的设计中必须对这一点加以考虑。

对于光敏晶体管，另一个你应该注意的事情，就是其带电流能力。一般来讲，它们不可能承受很普通的老式晶体管（三极管）那么大的电流，因此不要让它们带太大的负载。

4. 数字编码器

数字编码器是开关的一个近亲，当你旋动旋钮的时候，它将对一组信号线进行开与关的切换。跟开关一样，你需要添加上拉电阻或下拉电阻以保证其读数的可靠。

5. 其他IC

还有许多其他的芯片可用于提供输入信号。当同其他芯片进行交互时，有一点很重要，那就是定时。通常我们用一个输出信号来激活需要进行交互的芯片，然后再查看返回的数据。存储器芯片就是这样的一个例子。我们先把地址信号放到地址引脚上，然后再从数据引脚上读取数据。有一件事情需要我们进行特别考虑，这就是芯片对该命令做出响应所需的时间。每个数字IC在响应信号时都需要一个响应时间或传输延迟。我们必须保证在读取数据之前已经等待了足够长的时间。如果在输入端与我们需要与之交互的芯片之间还有其他的IC，那么就还需要加上它们的延时。不要仅仅将它们加到一起看一下是否工作就了事，还要进行具体的检查。一块芯片的参数超出额定指标的情况比比皆是，因此有些产品在实验室里可能会工作得很正常，但在量产以后，却可能看到难以解释的随机故障。

6. 输入指标

在处理数字输入时，有一件很重要事情需要加以考虑。每个微控制器都有被称为阈值的输入指标。这就是用来区分高电平和低电平的最低和最高电压（最低阈值和最高阈值）。必须保证你的信号或者高于最大阈值，或者低于最低阈值。如果什么时候你的信号大小处于两个阈值之间，那么即使看起来工作正常，这也会给你后面的工作带来麻烦。请记住，当信号位于这两个阈值之间时，我们将无法确定微控制器将把该信号看成何种电平，因而就无法知道它到底是高还是低。

7. 电位器

电位器（potentiometer，或pot）是一种可变电阻，它拥有3个引出线，分别称为高端（high）、滑动端（wiper）和低端（low）。从高端和低端两个引出线来看，它是一个电阻。滑动端的内部连接不是固定的，当其移动时，它将同电阻内部的不同位置相接触。以下是电位器的符号（如图3-34所示）。

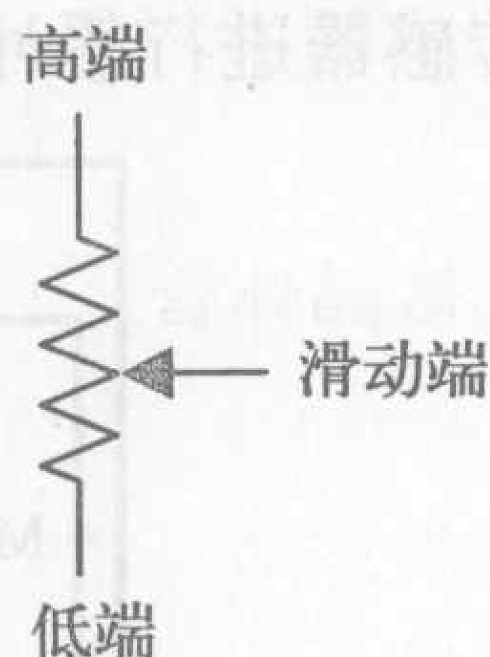


图3-34 电位器图示

如果将输入电压接在其高端，滑动端接输出，低端接地，那么得到的就是一个我们以前介绍过的分压器。电位器带来方便的一个地方是，我们可以通过旋转一个旋钮，很容易地调节这个分压器。如果你将滑动端连接到高端或低端，如图3-35所示，那你将得到一个可变电阻。

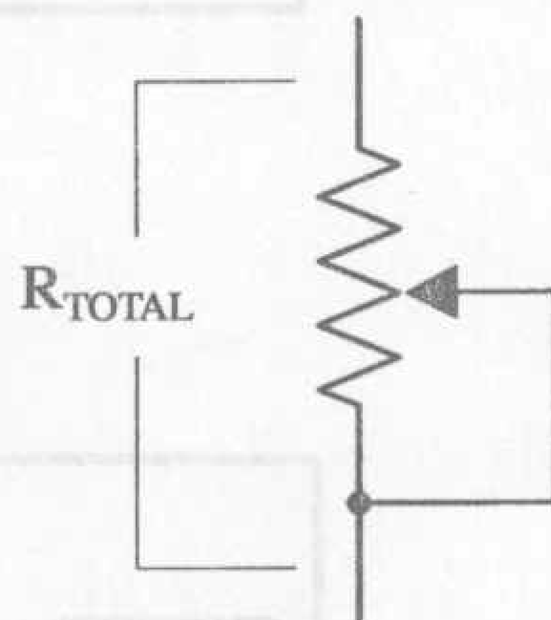


图3-35 由电位器构成的可变电阻

通常电位器具有很大的公差，其电阻值的变化可高达±20%。不过，当用于分压器场合时，这种变化不会有什么影响。这是因为，尽管总电阻有变化，但对于由滑动端确定的具体一部分来讲，其电阻的百分比不会有什么变化。

8. 模拟传感器

热电偶、光敏二极管、压力传感器、应变片、麦克风等等——可以列举出来的模拟传感器实在是太多了。由于选择太多，实在难以一一进行介绍。下面为各种传感器的应用提供了一些良好的准则。

(1) 接地

传感器的地到底应该接在哪里？在处理模拟信号时，我们必须注意传感器的接地和电源。通常信号线会直接连接到读取信号的芯片上，而地和电源的引脚却可能要经过多个IC之后，才能到达读取信号的芯片的相应引脚。这就使得其他IC的电流有机会干扰传感器的电流。

如图3-36是一个很不好的设计，各个IC的接地电流会在传感器信号中引起噪声。

如图3-37则是一个很好的设计，其信号线和地线都直接接往芯片，这可以保证A/D转换所用的输入信号含有较小的噪声。

(2) 传感器阻抗

你的传感器的输出阻抗是多少？若相对于所接负载的阻抗来讲，传感器的输

出阻抗太高的话，你也许不能指望信号会如你所想象的那样变化。这时你可能不得不对传感器进行缓冲，以使其免受负载的影响。

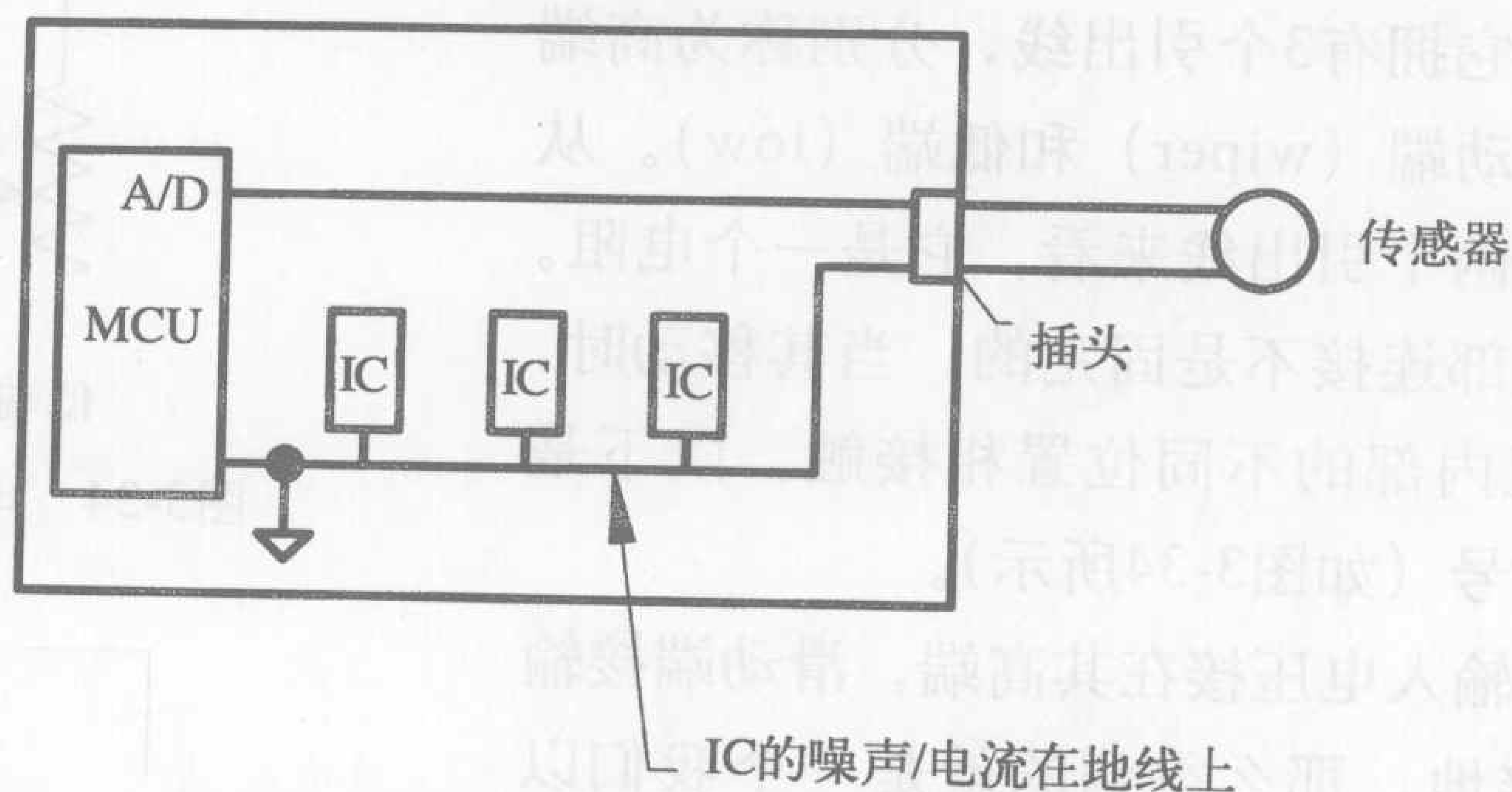


图3-36　不良的模拟接地布线

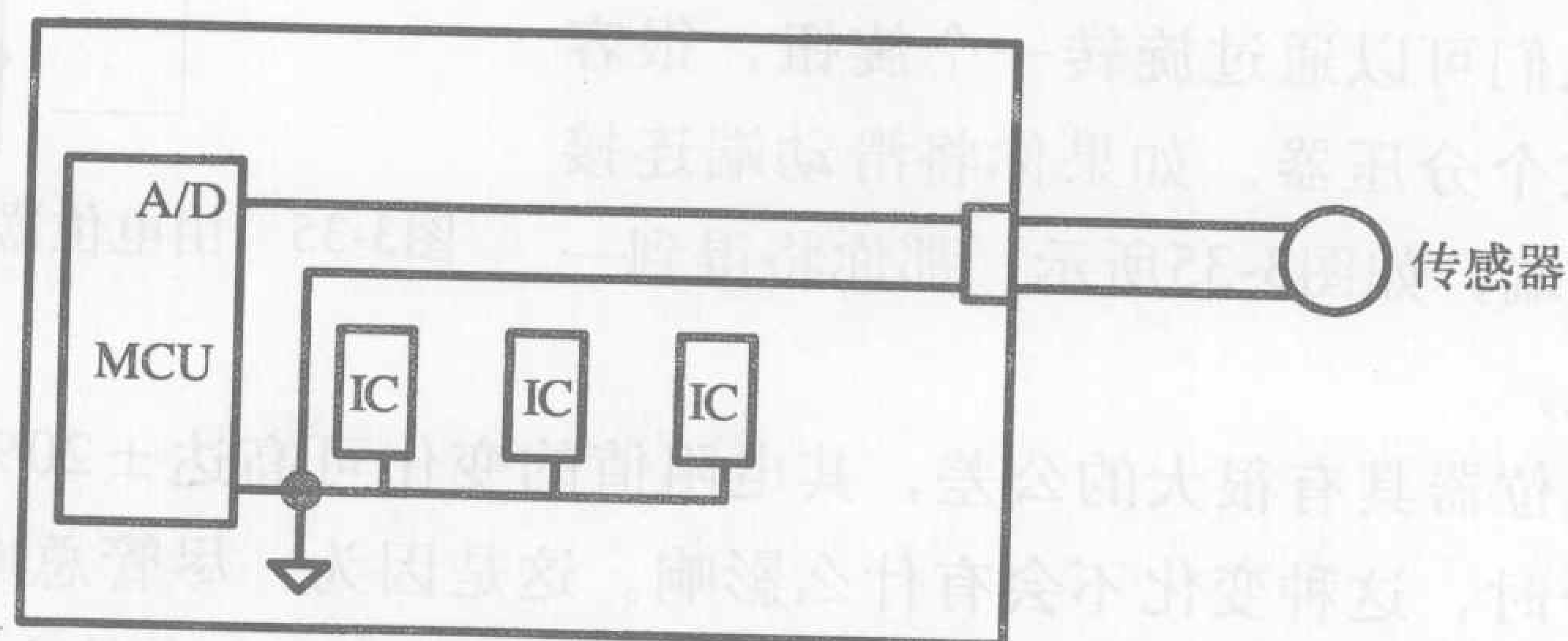


图3-37　优化的模拟接地布线

(3) 输入阻抗

大多数A/D转换器都有一定大小的某种输入阻抗，但它通常比数字输入的输入阻抗低得多。数字输入通常具有5MΩ到10MΩ的输入阻抗，而A/D转换器的可能只有100kΩ。要了解自己所用器件的输入阻抗，并确保其比传感器的输出阻抗大得多，这样才能放心去做其他的事情。不低于10∶1的比值可以认为是一个良好的起点。这意味着若你的A/D有100kΩ的输入电阻，那么你的传感器的输出电阻必须小于10kΩ，你的设计才是可行的。

3.5.2　输出

你可以将你的信号输出到大量各式各样的器件上。我们这里只介绍几种。先从一些常见的指示器和显示器开始。就目前来讲，其中最常用的两个是LED（发光二极管）和LCD（液晶显示器）。

1. LED

LED代表发光二极管（light-emitting diode）。LED需要电流来驱动。电流太小

的话，你将看不到光，太大的话则会出现故障，所以通常得在LED上串联一个电阻。到底需要多大的电流取决于你所用的LED型号，但通常的额定运行电流是20mA。LED是电流驱动型器件，这意味着其亮度取决于其中流过的电流的大小（而不是其上的电压降）。这也意味着你可以通过改变串联的电阻来控制亮度（如图3-38所示）。

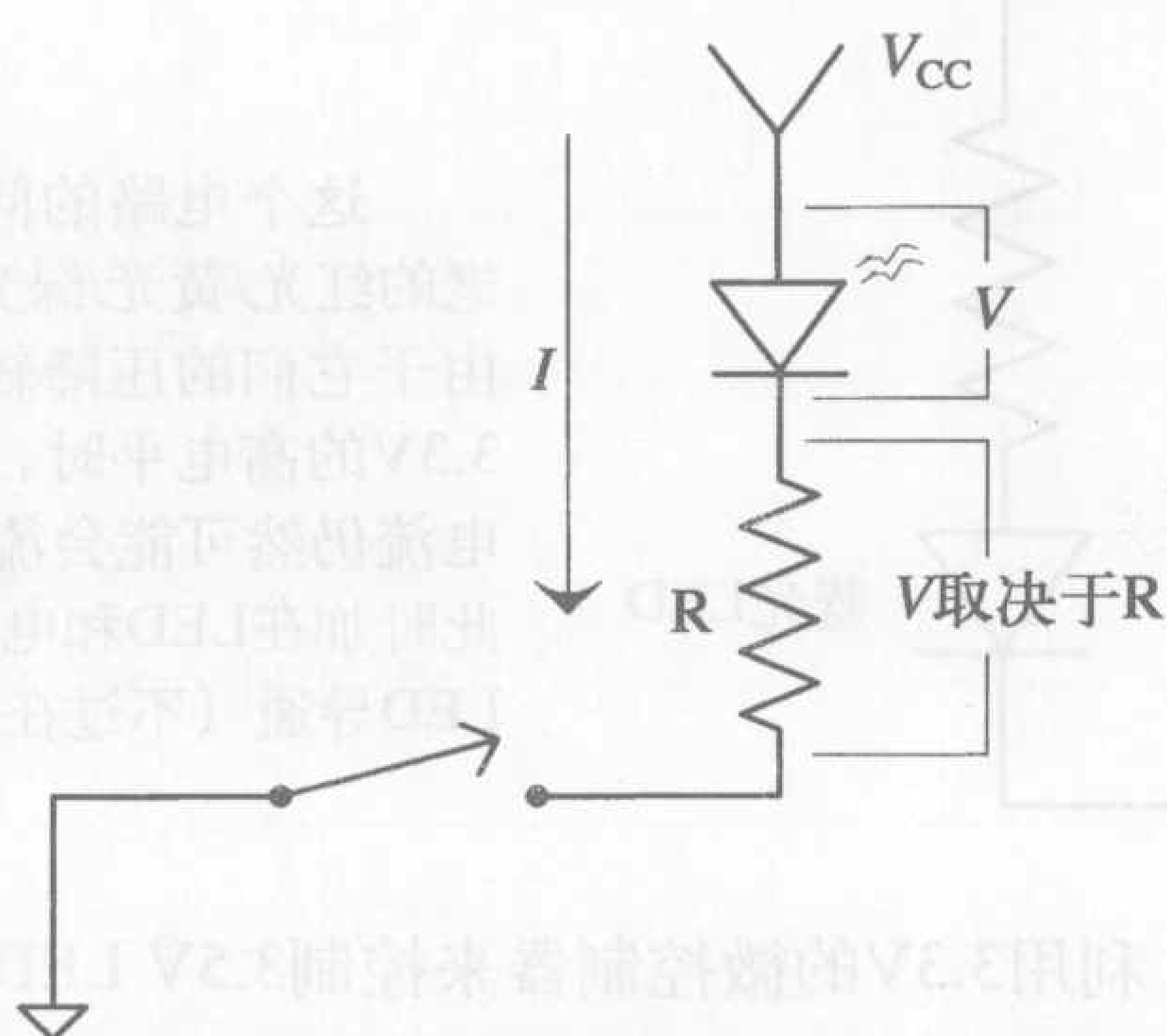


图3-38 开关控制的LED电路

当使用微控制器驱动LED时，有一件很重要的事情你必须予以考虑，那就是芯片的输出能力。输出引脚能够提供足够的电流吗？它能够吸收足够的电流吗？有太多的微控制器，其引脚只能够吸收电流，但却没有提供电流的能力。由于这个原因，我将特别介绍通过吸收电流来驱动LED的方法（如图3-39所示）。

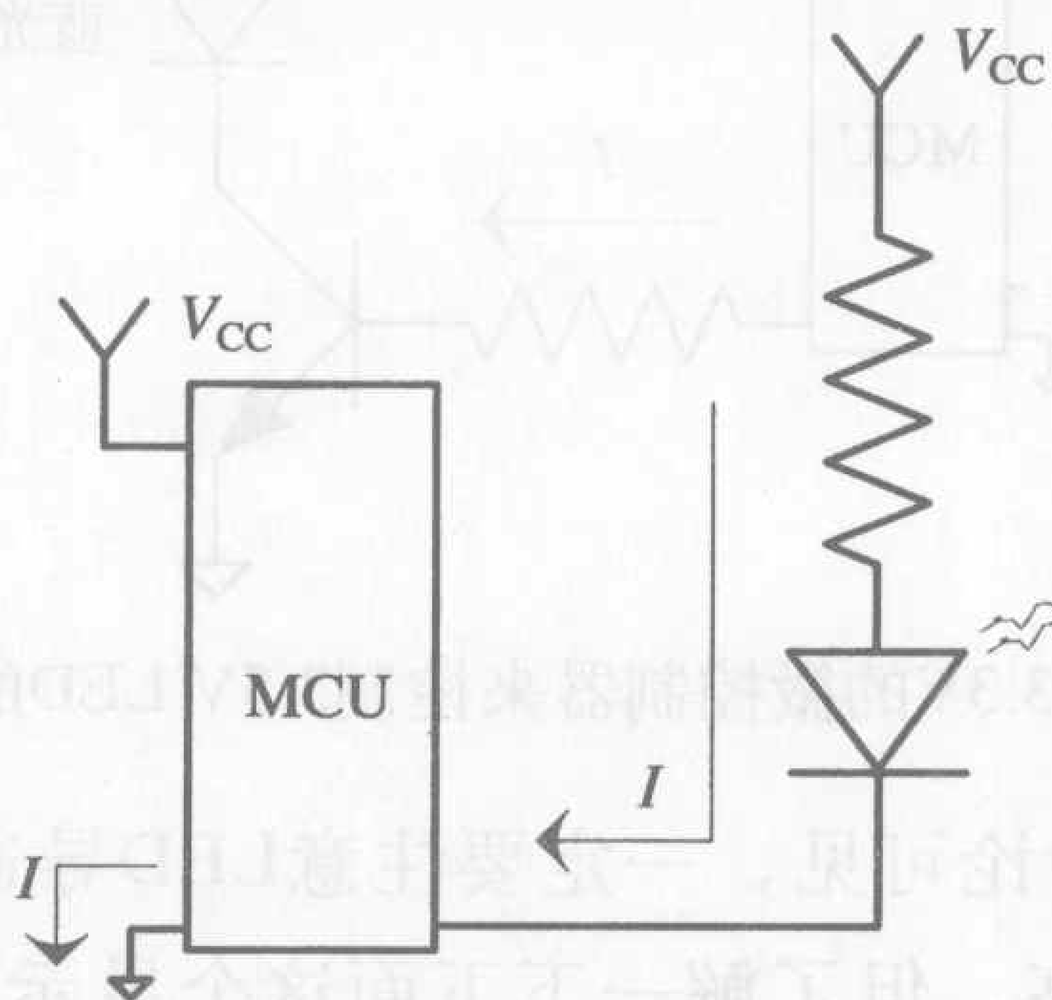
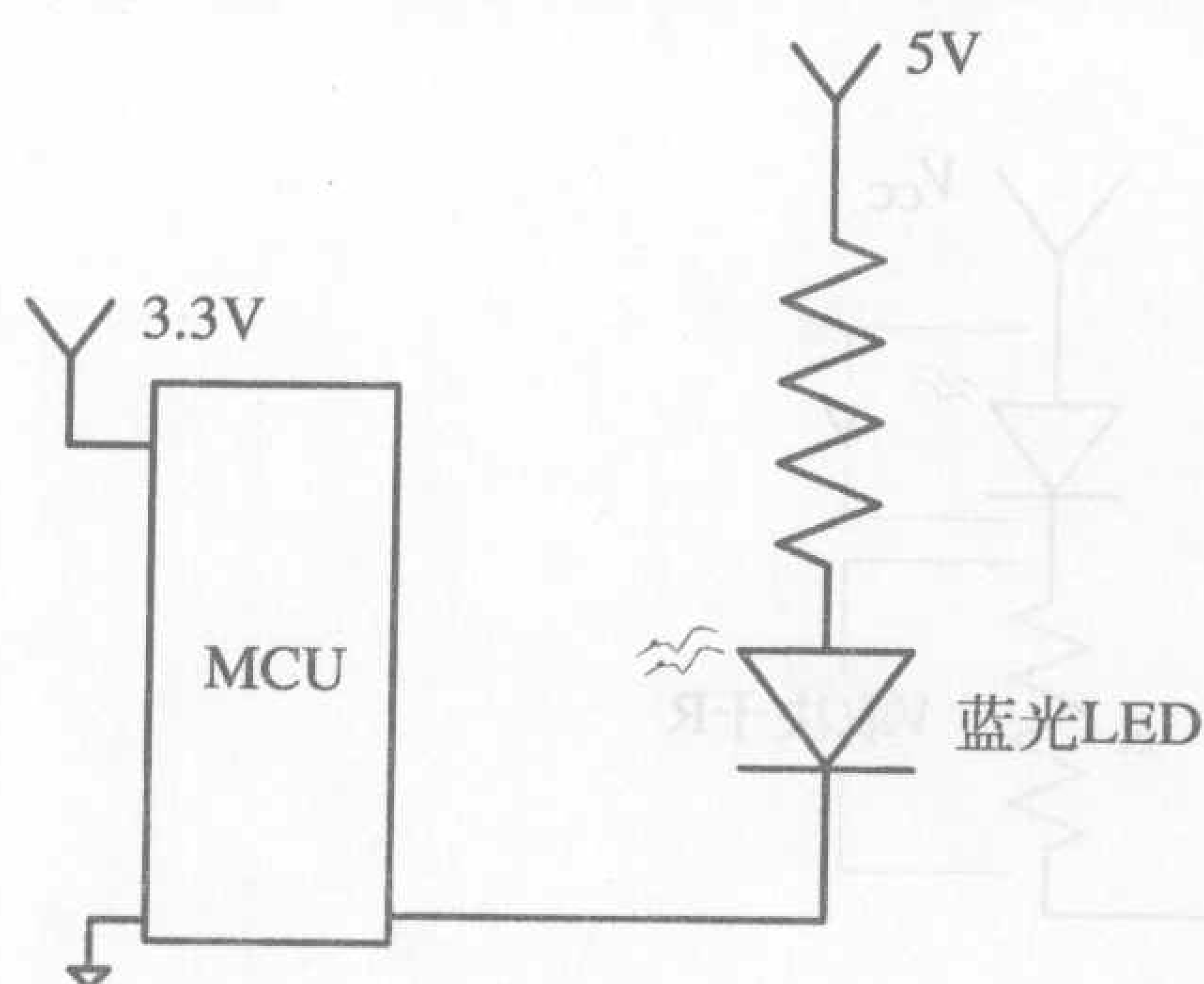


图3-39 微控制器控制的LED

你看清了电流是如何流入微控制器的吗？你必须确保输出引脚能够承受这个电流。此外还要注意，电流是从微控制器的接地引脚流出来、然后再返回到电源的。

LED有一个压降，这跟我们以前学过的二极管的情况是一样的。最新的蓝光和白光二极管的压降比我们从小所知道的那些发光二极管的高得多。红光、绿光

和黄光的LED的压降大约在1.0V到1.5V，而蓝光LED很容易达到3.5V。若想驱动一个蓝光LED，但你的微控制器却只能提供3.3V的供电的话，那你可以考虑采用下面的方法（如图3-40所示）。不过我不推荐这个方法，因为其存在一个潜在的问题。你能看出是什么问题吗？



这个电路的问题发生在当你想用便宜但较老的红光/黄光/绿光LED来替换蓝光LED的时候。由于它们的压降较低，因此即使在输出引脚为3.3V的高电平时，因LED的另一端是5V，所以电流仍然可能会流过输出引脚。算一下就明白，此时加在LED和电阻上的电压是1.7V，这足以使LED导通（不过在大多数情况下发光会比较暗）。

图3-40 利用3.3V的微控制器来控制3.5V LED的欠佳方法

在同样的条件下，下面是一个较好的驱动蓝光LED的方法（如图3-41所示）。

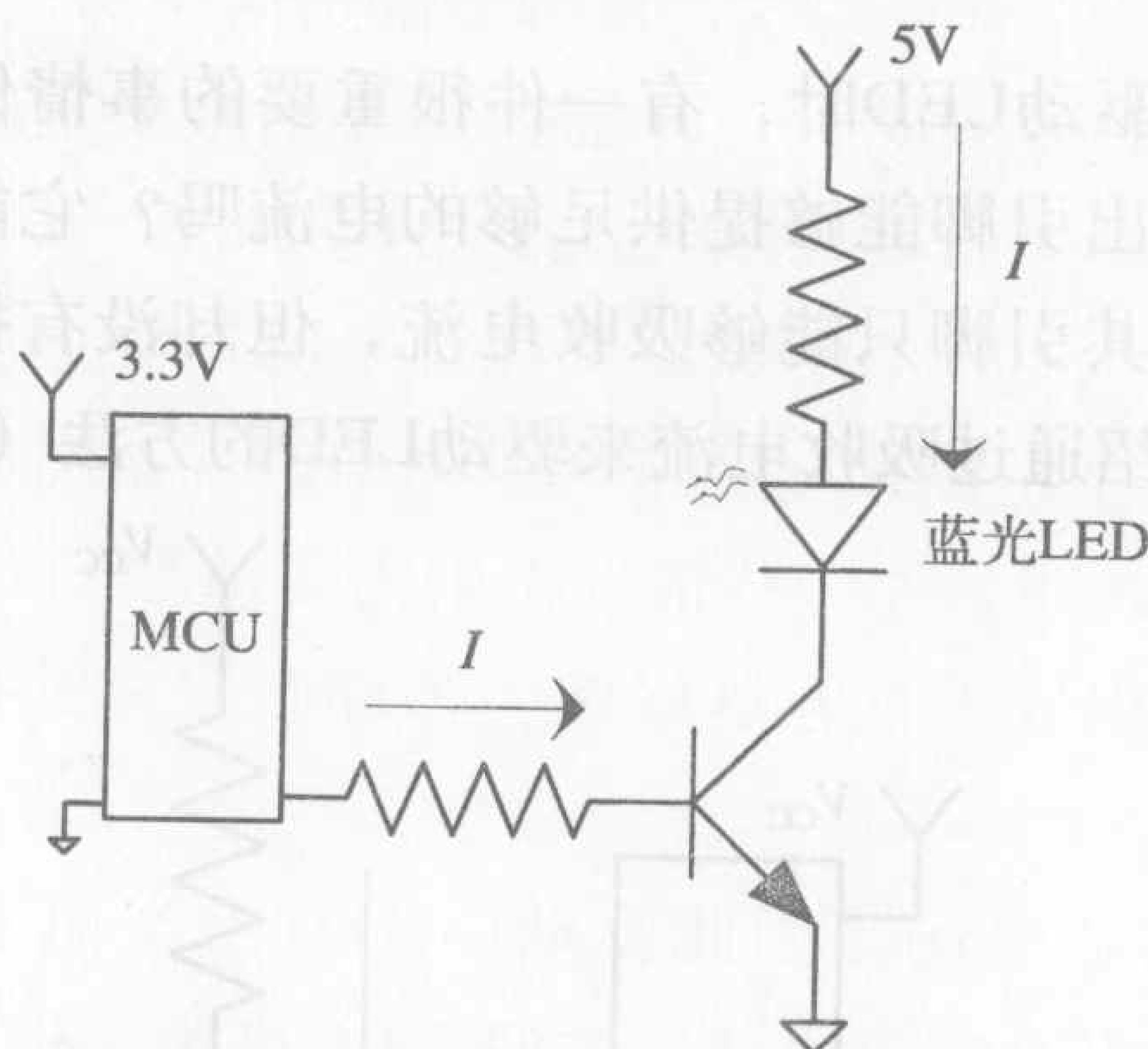


图3-41 利用3.3V的微控制器来控制3.5V LED的可靠方法

从以上对驱动LED的讨论可见，一定要注意LED导通所需的压降。尽管这些眨巴眨巴的LED灯十分漂亮，但了解一下下面这个显示更为流畅的器件（LCD）更加必要。

2. LCD

LCD代表液晶显示器（liquid crystal display）。LCD中的液晶是一种能够对电场做出响应的材料。在这种晶体的任何一侧施加电场，就会使晶体的分子沿着某个方向排成一条线。如果你能够排列出足够多的线，通过相应位置的光线就会被阻挡掉（如图3-42所示）。

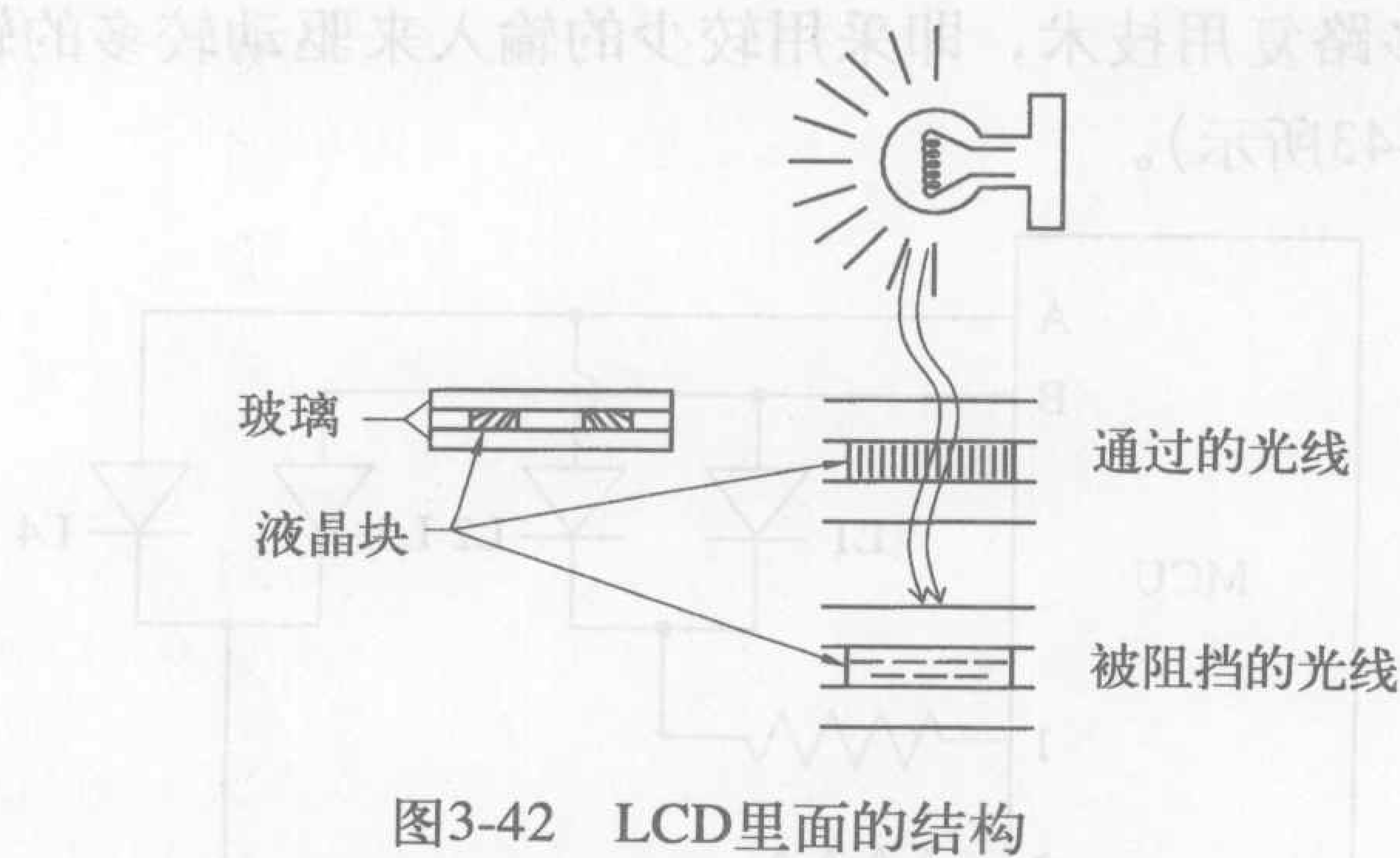


图3-42 LCD里面的结构

如果你给一个LCD施加偏置电压太久，那么其中的液晶将永久性地扭转方向而无法扭回到原来的位置。这就像你在计算机前坐得太久而导致脖子出现肌肉僵直一样。如果你不站起来动一动，那你可能会一直保持那种状态而无法动弹。而雇员们一起玩玩好的娱乐活动，稍微做点运动则可以避免这种痛苦发生。

LCD也遵从同样的哲学。应当经常将LCD的极性反转，以使所有的液晶转换方向。这样它们仍然可以阻断光线，但却全部指向了另一个方向。

这种要求使得驱动LCD成了一种维护任务稍微繁重的事情，因为你必须经常让其反转液晶方向。当你需要并联驱动多路LCD的时候，问题可能会变得更加复杂。你必须确保没有某个冗余的DC偏置在某个LCD块上加的时间太长，等等。

由于以上的原因，出现了大量的LCD驱动芯片。有时这个驱动功能也被直接做在微控制器之中，而在另外一些情况下则需要单独的芯片。你也可以特立独行，去做你自己的驱动，但我不推荐这样做。那样做很容易把事情搞糟，其实LCD驱动芯片是相当便宜的。

由于改变LCD的是电场，因此驱动LCD有点类似于驱动电容。每次你开关LCD时，将有一个小小的电流流过，类似于RC电路。但比起LED的情况来，LCD的这个电流并不很大，实际上它几乎可以被忽略。你可以把该电流做得如此之小，以至于一个电子表显示屏可以靠一个电池工作数年。记住，LCD块越大，电容就越大[①]，所需的电流也就越多。

3. 复用技术

你是如何同时做多件事情的呢？实际上你没有同时做它们！你只是每次做一件但做得非常快，以至于看起来好像你是在同时做多件事一样。（就像你一边听太太说话，一边看电视一样。不时地点一下头就能够产生出奇迹……）

在电子工程师们的世界里，能够同时做多件事是很有用的。做到这一点的一

① 记住电容大小是其表面积的函数。

个方法就是采用多路复用技术，即采用较少的输入来驱动较多的输出。看看下面这个例子（如图3-43所示）。

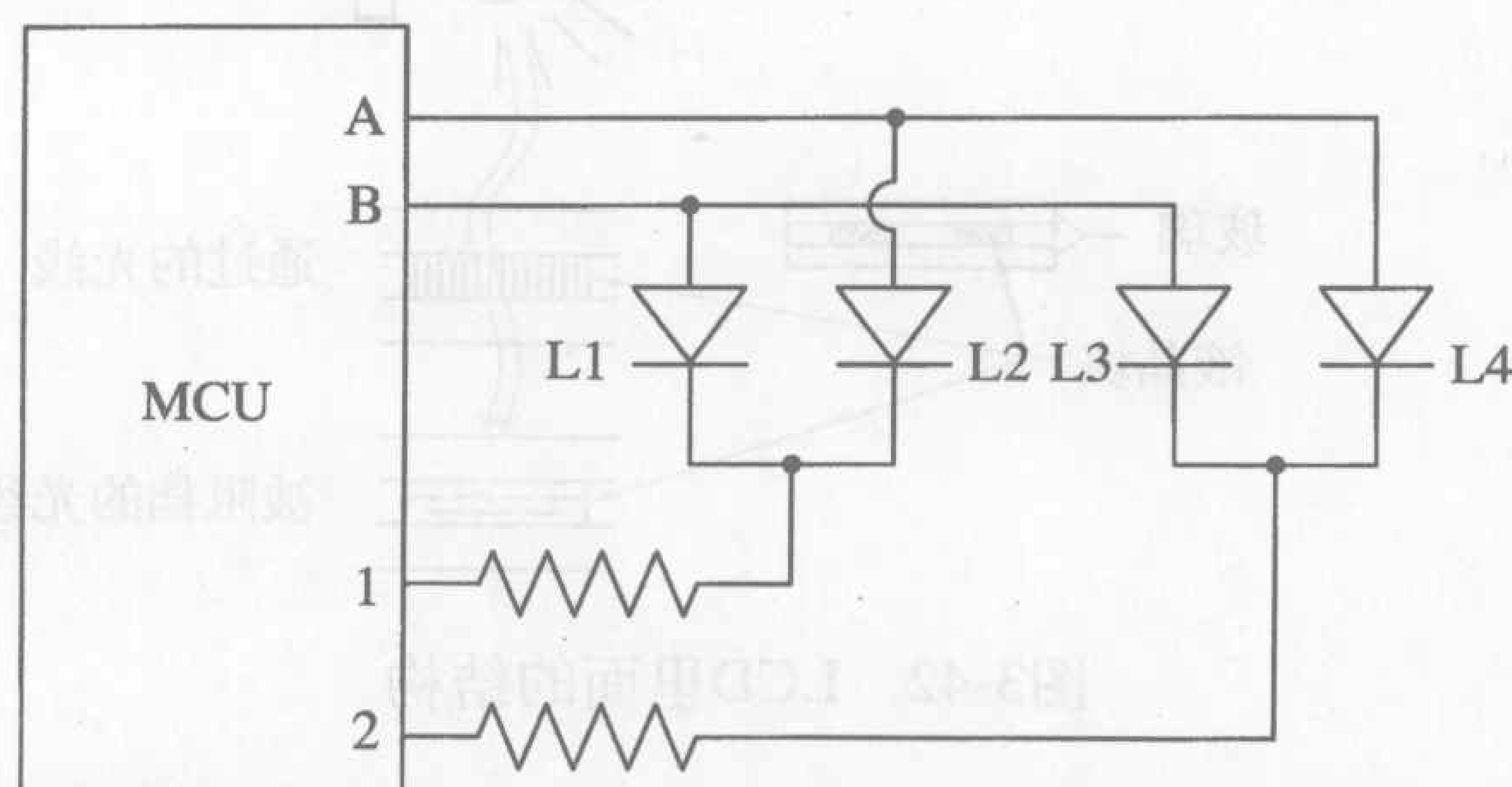


图3-43　多路复用驱动LED

在这个例子中，你可以通过在引脚1上加一个低电平，在引脚2上加一个高电平来使电流通过L1和L2。

由于LED的二极管特性（单向阀门，还记得吧？），当引脚1为低电平时，给引脚A或B输出一个高电平就可以点亮相应的LED。反转引脚1和2的电平，就可以选择使L3和L4点亮。如果能够将这个过程重复得足够快的话，对于人眼来讲，这些LED将好像是一直亮着的。在这个例子中，为了简单，我们用4个引脚来控制4个LED。若增加每组被控制的LED数量的话，你将很快看出同所用的引脚数量相比，可以控制的LED的数量增加得有多快。当一共有两组每组3个LED时，你用5个引脚就可以驱动6个LED，当一共有两组每组4个LED时，你用6个引脚即可驱动8个LED；当一共有两组每组8个LED时，只需10个引脚即可驱动16个LED。这是个相当便利的方法，尤其是当项目中的I/O面临用完，而你的老板又不让增加额外的微控制器和I/O的时候。请记住：这个很精巧的应用利用了二极管仅仅容许通过一个方向的电流这个特性。

4. 白炽灯

白炽灯就是常见的灯泡，它是最基本的一种指示器。灯泡由真空管和它里面的电阻丝构成。当真空管里的电阻性元件被加热到很高的温度时，就发出了光线。灯泡需要加热到很高的温度才能发亮，其需要很大的电流，由于微控制器很少有如此大的电流能力，因此无法直接通过一个端口来驱动灯泡。

5. 晶体管

晶体管是用来改变微控制器的输出电压（蓝光LED的例子即是）和提高输出电流能力的一个很好的方法。不要忘记在基极要串联一个电阻，因为将二极管开通并连接到地的时候需要限制电流。

6. 线圈

在各种可以接收信号的设备中，都有线圈或电感在里面。以继电器为例，你也许可以直接驱动它，但请先检查一下其所需的电流！我们往往需要用一个晶体管来处理负载问题。此外，翻一翻4.3.5节，了解一下线圈上感应的反冲电压及其处理方法。

经验法则

- 当输入设备是高阻抗的时候，应使用上拉或下拉电阻来维持输入信号。
- 当输入信号有效时，中断驱动的输入读取方法会停止微控制器正在做的一切。
- 轮询的输入读取方法使我们可以控制何时去检查输入。
- 输入器件的封装类型和能力多得不计其数，因此器件的参数表十分重要。
- 我们可以采用多路复用方法来驱动LED，以节约I/O。
- 晶体管是很好的改变电平的方法。
- 要注意设备中的线圈或电感，它们可能需要进行特别的考虑。

第4章 真实世界

真实世界是你我所处的地方。它既不在这本书里或一个仿真里，更不在一个原理图中。这些东西只是真实世界的表示，它们可以帮助我们了解真实世界如何工作。我们搭建和设计的任何电路，都会在某个点上与真实世界接口，有时候这可能只是一个按钮或一个显示屏。因此，对于那些用以连接到这个“万恶”的大千世界的东西，我们自然应该花点力气来介绍一下。

4.1 模拟量与数字量

4.1.1 相互转换

如果本书是在模拟计算机的时代写的，那么本小节是根本不必要的。但现在的情况是，只有加入这些令人生厌的小小数字芯片，才可能赚得最多的钱。如果你想把某个最新的小玩意儿当作很酷的数字技术产品推向市场，你的产品必须在某个部分进行了模拟方式与数字方式之间的转换。因此，了解一下如何才能实现从模拟到数字的跨越是个好主意。

4.1.2 模拟与数字

如果我们把模拟放在拳击场的一角，把数字放在拳击场的另一角，并让它们拳脚相向，那么你认为谁会赢呢？在今天的世界里，赢得欢呼的始终是数字！而令数字胜过模拟的真正原因是什么呢？下面就让我们去找找。先从模拟开始。

什么是模拟？它只是某个在今天的数字世界里已被遗忘了的老词汇吗？不，实际上模拟量主要用来指称一个连续变化的信号。这意味着被测量的信号可以在时间上被砍成无穷多的小片段。举例来说，有一个信号在一秒钟内在A到B之间变化。如果你在一秒钟结束以前检查测量的结果，那它将位于A和B之间的某个位置。它是一个连续变化的变量。无论你把时间分片划分得有多细，每片里面总包含有信号的信息。我们所感知的世界在本质上就是模拟的。阳光里面包含了从光谱一端直到另一端的无穷多的色彩。街上疾驰而过的汽车，其音量先是连续增大然后又连续降低。当你驾车的时候，你会根据路况和环境连续地改变车速。我们周围

的世界是模拟的！

那什么是数字呢？你会说我们的计算机就是。是的，我们的计算机是数字的。不过我这里想举个更基本的例子。请竖起你的一根手指[①]，放下，再竖起。这就是数字量！它就是要么在，要么不在。我不清楚这个例子中的"手指"（digit，同finger）是否就是"数字"（digital）这个术语的来源，但这个例子能够帮助我理解其含义。因此，数字量的最简单的形式就是两种状态：在或者不在。

让我们做点更深入的思考。在数字量的状态发生改变的时间里，它是什么状态呢？当我们的"数字指"从完全放下的状态变化到完全竖起的状态时，让我们盯着它看，此时它是什么状态呢？如果你仔细看，将会发现数字信号其实在本质上也是模拟的。这是真的。正如我的一个工程师朋友喜欢说的："根本就没有数字量存在，所谓的数字量只不过是看起来很古怪的模拟量而已。"所以数字量其实只是一种感觉模式：你在一个专门定好的时间点上查看某个信号，并确定它存在还是不存在。数字量只是预先定义好的一个模拟电平。

如果数字量真是化过妆的模拟量，那我们为何还要如此这般地用它来麻烦自己呢？很早以前，人们就发现数字信号在通讯中工作得很好。还记得电报吧？它用数字的点/线序列来代表一个字母。为什么它会工作得很好呢？让我们再来看看"数字指"的例子。它到底是竖起的还是放下的，这对于远处的观测者来讲显然很清楚。事实上，高速公路上每天都在使用这类的信号。总之，在通信中使用数字信号可以避免通信误差。

那么使用数字信号有什么缺点呢？电报没用多久，很快就被模拟形式的通信取代了。其中的原因跟带宽有关（带宽是一个信号所能承载的信息数量的一个量度）。模拟信号能够承载巨大的信息量。对于一个给定的信号范围来讲，它实际上可以分出无穷多个不同的位阶。

回到手指的例子。如果你有一个很好的望远镜，并让其聚焦在手指上，那么你将很容易看到手指能够代表大量不同的位阶。如果你没有望远镜但有一个巨大的手指的话，也可以做到同样的事情。这意味着同数字信号相比，模拟信号更容易承载大量信息。然而为了利用这一点，你必须像电视剧《家居装饰（Home Improvement）》中的男主人公——刀具工Tim所说的那样："你所需要的就是更大的功率！（轰隆！轰隆！）"如果信号的功率不够大，那么噪声和其他无用的信号将很容易使信号损坏。当你离自己喜欢的电台太远的时候，收音机的声音会变得

① 好啦，一个人的背景不同、竖起的手指不同，有时你会高兴有时你却会被冒犯。不管哪种情况，当你在自己的房间里阅读到这里的时候，我想肯定不会有人看到你给自己竖起手指。因此我建议大家在这个例子中使用食指。

模糊不清，就是这个道理。有时你可以通过使用较好的滤波器和元件，来给你的收音机“更大的功率”。但总体来讲，在模拟系统中，信号的完整性一直是个需要改进的问题。

为了使数字信号传输更多的信息，它就必须工作得更快。当人们想要彼此交谈时，使用模拟信号更为容易。目前的数字技术的频率还不够快，还不能表示音频信号中的所有复杂度。因此，许多年以来，通信方面的研发精力主要集中在信号的模拟编码和解码上。不过，在另一个领域里则完全使用数字信号，这就是布尔逻辑的应用领域。

当用数字信号来表示布尔状态（一个状态表示“真”，另一个状态表示“假”）的时候，计算机就产生了。像“*如果这个是真，那么就做那个*”这样的事情，也就可以用机器来完成了。布尔逻辑是以把这个真实的世界用数字表示为基础的。不过你不要以为世界上就只有数字计算机。曾有一段时间，人们采用了大量的模拟计算机来处理牵涉到大量信息的计算任务。但数字处理的速度增长很快，最终取代了这些应用。

• 先有模拟量

模拟量的优点是可以表示大量的信息，并且我们周围的世界用模拟信号可以得到更好的表示。其缺点是为了处理模拟信号，在发射器和接收器上需要消耗更多的功率，并且模拟信号更容易受外界的影响而损坏。

• 然后有数字量

数字量的优点是传输功率低，能够表示逻辑状态。其缺点是信息量有限（低带宽），必须以更快的速度运行才能够处理大量的信息，并且我们的世界本来就是模拟的而不是数字的。

• 综合两个世界的优点

如果能够综合这两个世界的优点该多好呀！这就是工程师们所想的，因此他们创造了两个缩略语以使这一切开始发生，这就是ADC和DAC——模拟－数字转换器（analog-to-digital converter）及数字－模拟转换器（digital-to-analog converter）。让我们看看这到底是什么。

4.1.3　A（模拟）到D（数字）的转换及反向过程

什么是从A到D的转换（ADC，analog-to-digital conversion）呢？它是一种宗教体验？还是从D（数字）到A（模拟）的转换（DAC，digital-to-analog conversion）的反向过程呢？A到D的转换所牵涉到的，就是如何将真实世界中的信号转换成1和0，然后用数字技术来处理它。你可以说D到A的转换就是其相反的

过程。这里我们将探讨一下到底什么是A到D再到A，以及它有什么用处。

1. A表示模拟量

当对模拟量进行转换时，我们按照预定的时间间隔，将其分割成一个个的片断（每秒钟分割的次数就是采样率，采样率越大，数字化的频率就越高）。然后在各个时间点对信号进行测量，并给其赋上一个数字值。可以把数字信号的几个位（每位通常用1和0表示）塞在一块，以表示不同的模拟量位阶。一位可以表示两个位阶。如果你采用的是二进制计数系统，那么随着位数的增加，位阶的数量将按2的位数次方增加。4位提供16个位阶（2^4），8位提供256个位阶（2^8），等等。确定信号位阶的一个常用方法是采用比较器（如图4-1所示）。

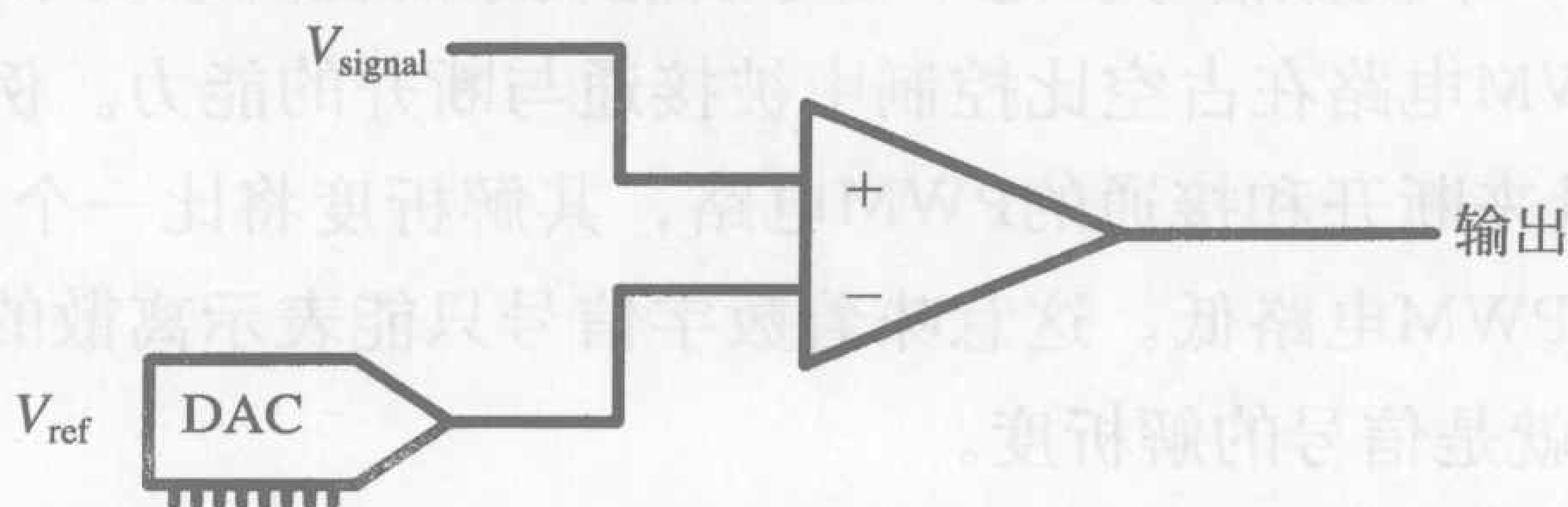


图4-1 比较器驱动的ADC

还记得运放的这个应用吗？在这里，输入信号同一个参考电压相比较。我们将参考电压从最小值一直变化到最大值，当信号比参考电压大的时候，运放构成的比较器就将输出高电平，即“1”。当参考电压大过输入信号时，输出将变为低电平，即“0”。如果电路能够辨别输出改变状态的时候V_{ref}的数值，那么这个V_{ref}就近似等于输入信号V_{signal}。我说“近似”相等，是因为总存在分辨率的问题。要了解这个问题更多的信息，请接着往下读。

2. D代表数字量

现在我们已经有了一个数字信号，我们可以对其做很多有趣的事情。譬如我们可以传递它、处理它，而无需担心信号的损失。举例来说，我们将吉他音乐转换成数字的形式，并加入一些雅致的音响效果。下一步我们该干什么呢？我们总不能直接把数字数据送出去给大家听吧。我们必须把它转换回模拟信号！为什么呢？因为有些信号只有在模拟格式下我们才能够更好地感受。如果你不相信，可以看一看你汽车上的速度计，我敢打赌它是模拟表（有些信号我们喜欢表示成数字的形式，这是因为我们不想去处理那无穷多的位阶）。为了把数字信号转换回模拟信号，电路必须对该数字信号所代表的模拟信号进行模拟。这种模拟总需要某种形式的滤波。将数字信号转换成模拟信号有很多种方法。我所喜欢的一种方法是使用脉宽调制（PWM）。在PWM电路中，设备的输出按给定的频率被断开和接通。接通的时间在一个周期中所占的百分数就表示模拟信号的大小。这个百分比

称为占空比（如图4-2所示）。

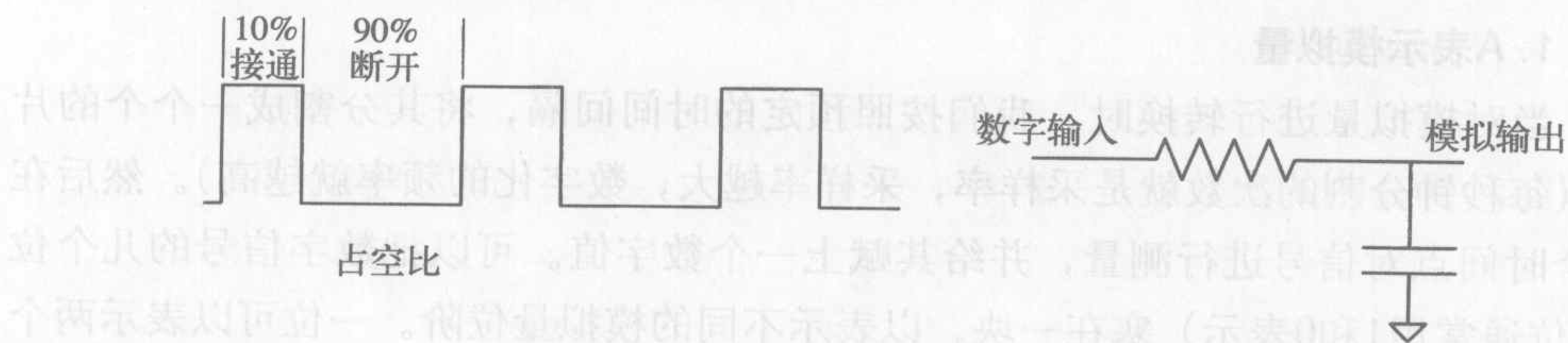


图4-2 占空比控制的模拟输出

数字化的PWM信号被输入到一个低通滤波器，从而将信号中的开关频率去掉，剩下的基本上是一个模拟信号。这个信号所能表示的位阶取决于PWM信号的解析度，即取决于PWM电路在占空比控制中被接通与断开的能力。例如，一个能够以5%的占空比增量来断开和接通的PWM电路，其解析度将比一个可以按1%占空比增量进行控制的PWM电路低。这意味着数字信号只能表示离散的有限个模拟信号位阶。这些位阶就是信号的解析度。

为什么解析度如此重要呢？在比较器的例子中，我们假定电路能够辨别V_{ref}处于什么位阶。它是怎么来辨别的呢？它必须以某种方式来产生该位阶！它利用某种DAC方法来实现这一点。这个DAC过程的解析度将决定这个ADC过程的解析度。

到此为止，我们从模拟信号出发，进入数字信号的领域，最后又返回到了模拟信号。这确实是兜了一个大圈。下面让我们来看一些具体的实例。

4.2 ADC离不开DAC

不久以前，我给一个青年工程师解释“世界的本质是模拟的”这个观点。他给我发来了这样的电子邮件回复：

对于你所持的“我们所感知的世界在本质上是模拟的”观点，我将提供一些反面的例子。我认为在这个世界上，靠数字来感知的东西如果不是更多的话，起码也跟靠模拟来感知的东西一样多。一些例子：活着或死亡，白天或黑夜，开或关，湿或干，动物或植物，统治者或被统治者，掠夺者或被掠夺者，粗糙或光滑，热或冷，模糊或尖锐，开或关，单和多，掩饰或警告，平原或高山，森林或沙漠，暴雨或天晴，噪杂或安静，失明或复明，男人或女人，丰收或饥荒，生存或死亡，亮或灭等等。尽管有像暖和、微风、日落及其他一些可以信手拈来的东西，但我认为我们的自然感觉是数字的①。

① 他是我的一个好朋友，名叫Michael Angeli。我很喜欢他的写作风格，也许有一天我将同他在某些事情上一起合作。

在很多方面他是对的，因为他的陈述是如此的雄辩，不过他指的是感觉。人类把来自物理世界的模拟信息放入了“数字的桶里”。我认为我们这样做的原因是为了便于决策，为了限制信息的储存量，以及为了容易交流。在可以进行数字感觉的时候，我们就会强加我们的数字感觉。也许这样说更好：“这个世界在本质上是模拟的，但我们会对这个模拟世界施加我们的数字感觉。”将这一点记在心里，让我们来看看AD转换中的一些更具体的细节。

ADC代表模拟到数字的转换。如何实现这个过程呢？在许多情况下，我们将从一个DAC（数模转换器）和一个简单的比较器开始。还记得前面利用运放来构成的比较器电路吗？根据一个输入是高于还是低于另外一个输入，运放将输出一个或高或低的电平信号。现在是利用比较器的最好时机，因为数字电路喜欢明显有高有低的信号。转换的基本过程是这样的：我们把一个数字转换成一个已知的模拟位阶，并和输入的模拟信号相比较，如果二者很接近（解析度就表现在接近的程度上），那么我们所使用的这个数字就代表输入的模拟量。请再熟悉一下下面的原理图（如图4-3所示）。

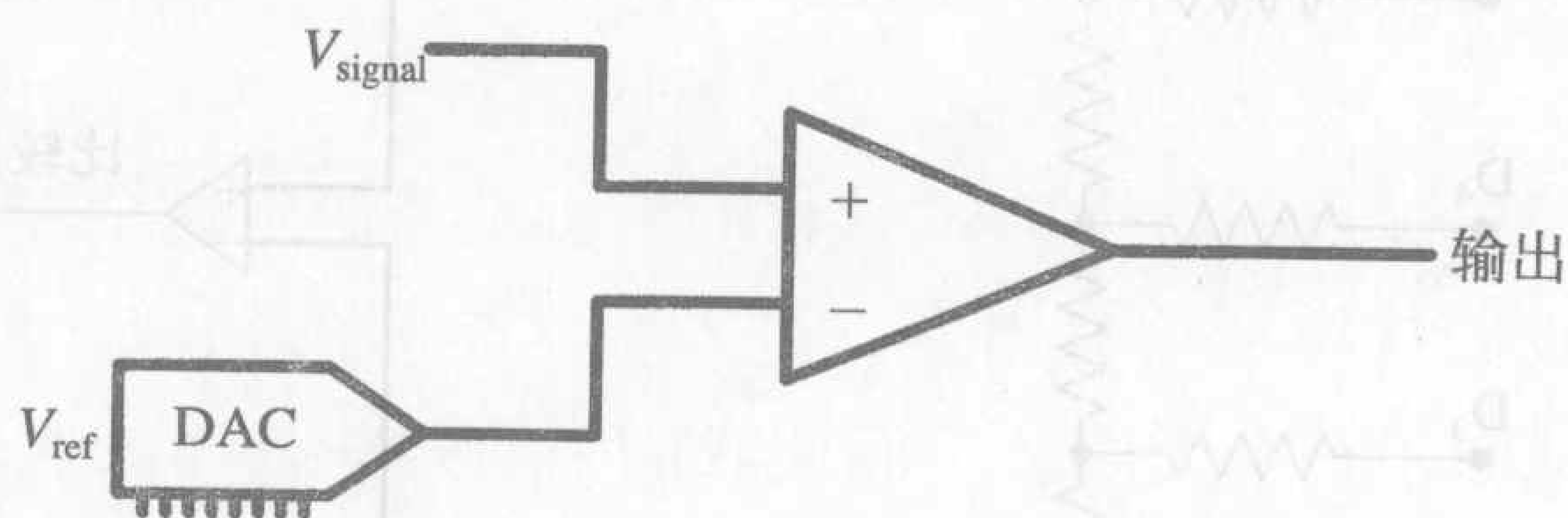


图4-3 比较器驱动的ADC

让我们来举个例子。假若我们将对一个4.5V的模拟信号进行转换。我们试着让DAC输出1V，比较器说“比它高”。然后我们试着输出2V，比较器还说“比它高”。接着我们试3V、4V。猜猜每次比较器都说些什么。当然都说“高”。那么接下来试哪个呢？当然试5V。这次比较器会说“比它低”。现在我们的电路就知道该值在4~5V之间了。它会猜一下，从二者中选一个。DAC的解析度（解析度指最小步长）越好，我们对模拟信号的估算就越接近。

有一个更快更好的方法，它不用对整个范围内的比较值进行扫描。它在第一次试探时，让DAC输出整个范围的中间值。在本例中是2.5V。然后根据比较器说什么，来做出逻辑判断（数字电路擅长处理这种事情）。如若比较器说“比它高”，那我们可以去掉所有低于2.5V的比较值。然后我们用剩余范围的正中间值来做为下一个输出，在本例中是3.75V。再看比较器说什么，然后再去掉一半的比较值，并对剩余的范围输出其中间值。重复这个过程直到用尽解析度为止（比较范围缩到最小），这时我们就得到了模拟信号的一个近似值。这是一个速度很快的逼近模

拟信号的方法，称为逐次逼近法。这个方法常用在需要进行高速模数转换的场合。

你注意到没有，在谈到AD转换过程时，我常常使用"近似"（approximation）这个词。这是因为数字信号几乎从来都不会真正跟一个模拟信号相等，它总会跟模拟信号之间有段距离。不要忘记"数字"意味着其所牵涉到的是离散的一个个台阶。而根据定义，模拟则具有无穷多的位阶。现在我们已经掌握了AD转换过程背后的基本原理，就让我们来看一些可以实际使用的DAC实例吧。

如图4-4所示是一个获得数字电压位阶的简洁方法，你可以将这个R2R梯形电路做在一个很紧凑的封装里。需要注意的是，不要直接将其接在任何低阻抗的器件上而不使用任何缓冲器，因为其输出很容易受到外部负载的影响。

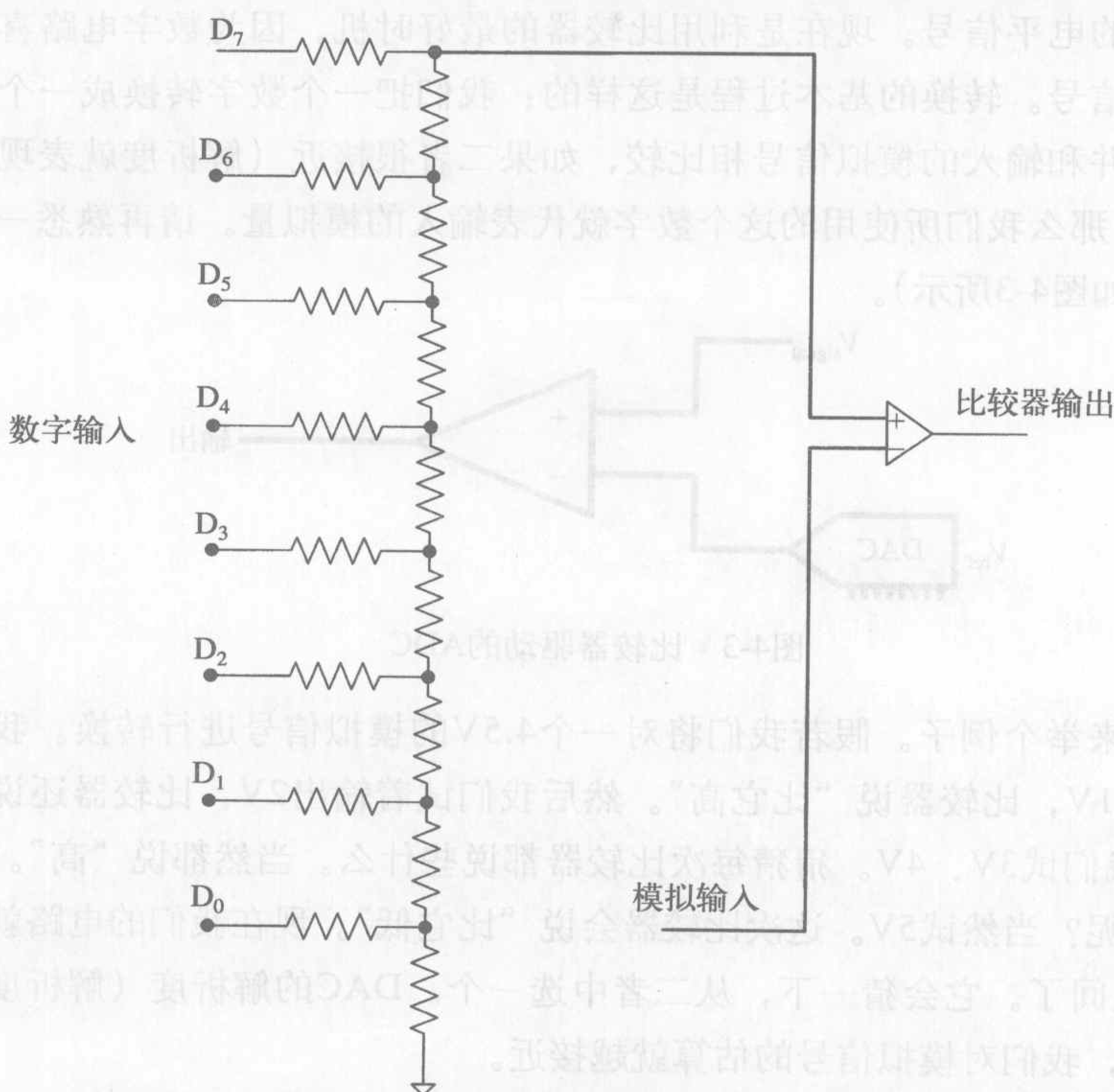


图4-4　R2R梯形电路

这个梯形电路是如何工作的呢？当一个数字字节被输入到梯形电路上时，它将改变比较器的输入电平。你应该可以注意到，MSB（最高位）对该电平的影响最大，LSB（最低位）对该电平的影响最小。在前面介绍的逼近原理中，这个方法可以工作得很好。你只需简单地将希望的DAC值加载在电阻上并观测输出信号。它的速度很快。其最大的缺点是用了太多的输出引脚（这些输出引脚必须能够吸

收或供给足够大的电流，才能保证电路的正常工作)。一点提醒：请确保你的处理器能够满足梯形电路的输出负载要求。在我的一个应用中，曾使用了Zilog公司的处理器，它工作得很好，甚至还为ADC处理提供了一个板载的比较器，不过我用完了它的每一个引脚，没有为其他信号的处理留下多少余地。

在图4-5这个电路中，PWM信号的占空比是一个从0%一直变化到超过比较器输入的模拟信号值的斜坡函数。当比较器改变状态的时候，相应的PWM信号的占空比（百分数）就表示输入的模拟信号大小。其中的RC滤波器必须能够将PWM信号转换成一个稳定的模拟信号，这意味着PWM的开关频率必须要比我们要数字化的信号变化更快。

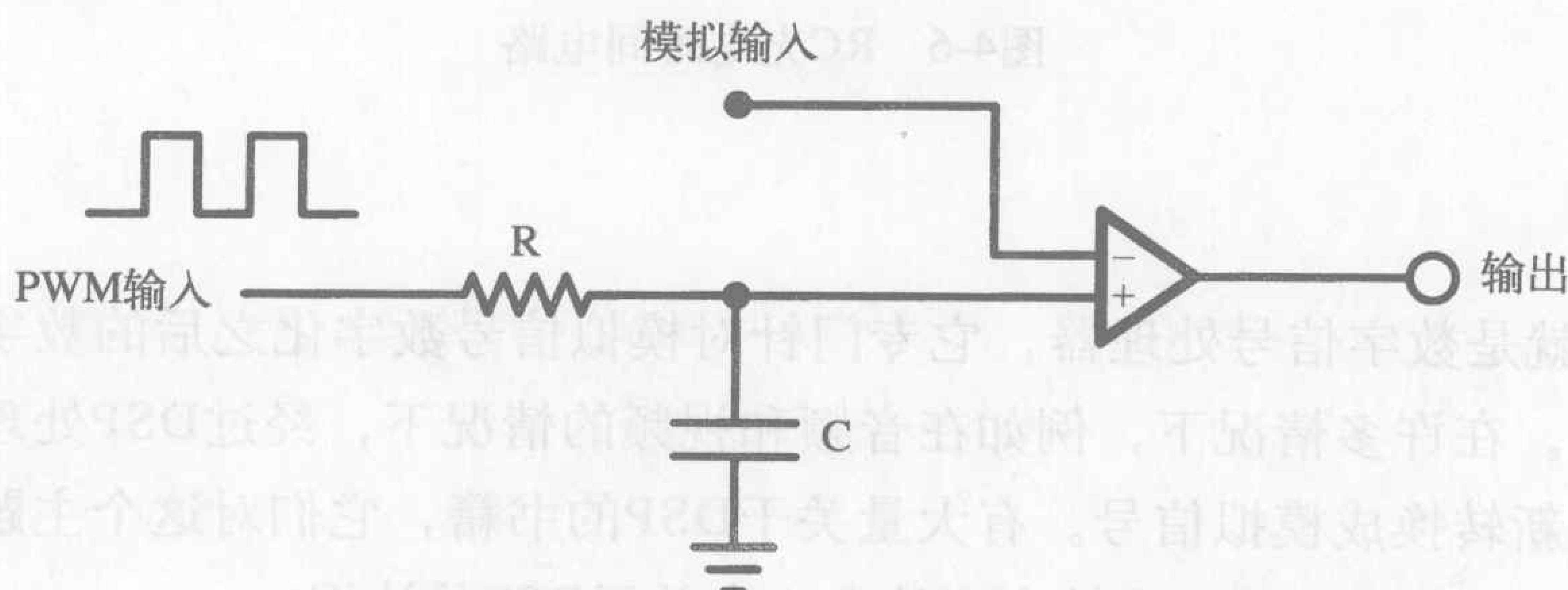


图4-5　PWM斜坡电路

如图4-6所示的这个方法则依赖于基本RC电路的瞬态影响。阶跃输入将使比较器的输入按照RC电路的响应时间所确定的规律来增大。RC电路的输出等于V_i（1−$e^{-(t/\tau)}$）。因此如果我们知道τ的数值（它等于$R\times C$），那么就可以根据所已经过去的时间长短来计算电压。在某些微控制器中，这将是相当繁琐的，但由于通常不需要很高的精度，因此可以采用查表的方法实现。在许多情况下，还会在这个电路里添加一个电阻较低的放电通路，以保证RC电路的输出能够从0开始。这个方法的缺点是需要计算曲线，不过在开始的3个τ的时间里，信号可以用直线来进行很好的逼近。对于某些应用来讲，这样做可能已经足够好了（请回顾本书开头所讲述的电子学和手雷之间的联系，以理解什么时候情况是“足够好的”）。如果你的项目要求不是特别高，并且你电路的输出也没有太靠近上“轨”，那么你可以仅仅计算时间而无需进行复杂的计算，因而使这个方案成为一个快速、便宜、廉价的ADC。

到此为止，我们介绍了3个容易实现的方法来对一个模拟信号进行数字近似。不过，所有这些电路仅仅只是好用的DAC而已。

最后再考虑一下——在如今的微控制器中，内建A/D转换器的情况已经越来越普遍了。然而，它们几乎都采用了使用一个DAC来实现一个ADC的方法。因此，

学习本小节可以帮助大家理解AD转换中实际进行的过程。你对电路内部的工作机制了解得越多，你作为工程师的水平就越高！

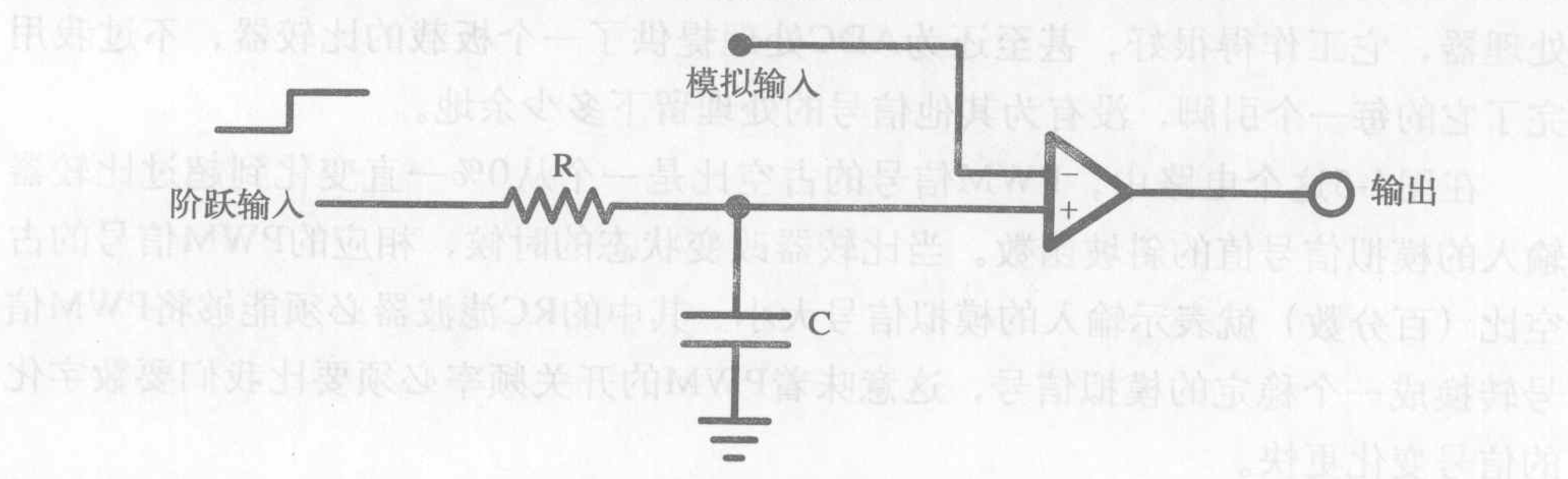


图4-6　RC充电时间电路

DSP

DSP就是数字信号处理器，它专门针对模拟信号数字化之后的数字信号进行各种处理。在许多情况下，例如在音频和视频的情况下，经过DSP处理之后，信号再被重新转换成模拟信号。有大量关于DSP的书籍，它们对这个主题已经介绍得很好，因此我在这里只求让大家建立一点关于DSP的认识。

DSP的一个优点在于，它能够根据所需滤去的谐波情况，来改变滤波器的参数。这就使得工程师们可以创造出许多难以用传统的模拟设计来实现的信号处理新方法。

通常，DSP方案要比模拟方案昂贵，所以要弄明白你真的需要这种方案。不要在一个可以用25美分的运放来完成任务的地方，浪费一个5美元的DSP。这并不是说DSP没有用武之地。没有DSP，我们就不会有MP3、WMA、AC3、MP4、WiFi以及一大堆其他的缩略词产生出来。细想起来，DSP技术所产生的缩略词可能要比其他任何技术都多。

经验法则

- 模拟量是一个连续变化的信号。
- 数字量是离散的一个个台阶。
- 解析度是离散的台阶之间的差距。
- DAC常在ADC中用到。

4.3　让物体动起来——机电的世界

在真实的世界中常会发生的一件事情就是移动物体。而在电子学的世界里，

一个很常见的任务则是要消除松动的部件。不过我相信在你的职业生涯的某个时候，你也许需要使某个物体运动起来，你因而将被推入机电器件的世界里。当我离开学校的时候，一张邮票的边角就足够我写下自己对电机的全部了解，所以我认为有必要对电机的一些基础知识以及其他几个机电器件做一些介绍。

4.3.1 DC电机

几年以前，当我的大儿子得到一个Lego Mindstorms®机器人套装作为圣诞礼物的时候，他十分兴奋（为不知道的人来解释一下，它就是Lego公司生产的一个已经组装好的机器人套装）。我妻子说当我看到这个玩具时，要比我儿子还激动。我不同意她的看法，但我现在不想谈这个。机器人的全部看点就在于它能动。Lego的套装采用了微型DC永磁电机以及齿轮之类的部件来实现驱动。由于这种电机应用是如此之普遍，所以我想我应该对DC永磁电机做点解释，并介绍一下它们的控制问题。

DC永磁有刷电机也许是最容易理解的电机了。它只有少数的几个部件：一个电枢，几块磁铁，一个外壳，一些导线和电刷。我还记得在我小的时候，曾利用几颗钉子，一根木棒和一些电线来制作电机。如图4-7所示。

将导线沿着电枢绕成回路，你就可以做成电机。导线的两端终止在一些金属块上，这就是电刷摩擦的地方，如图4-8所示。

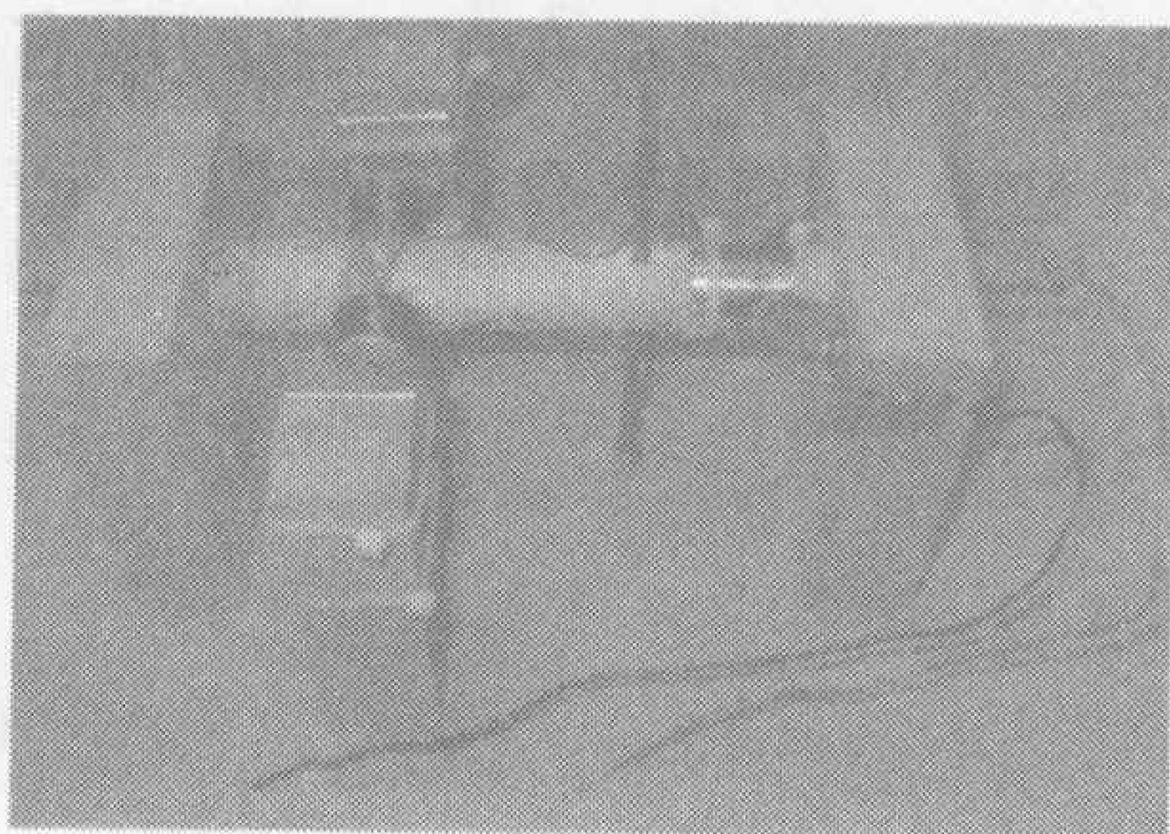


图4-7 手工制做的DC永磁有刷电机

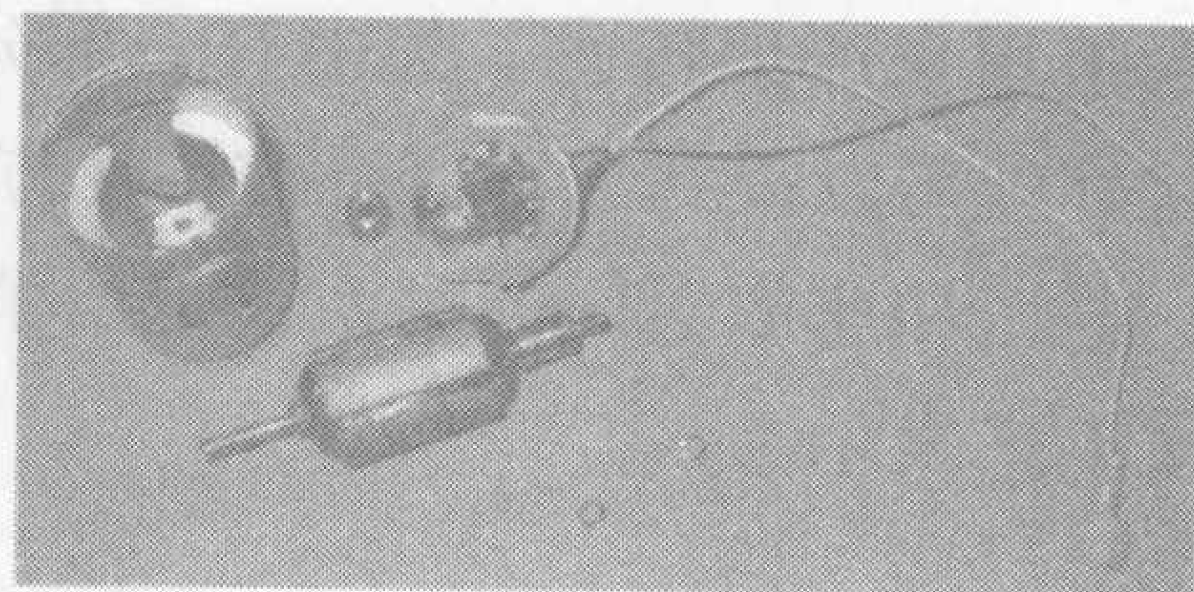


图4-8 拆开的电机

永磁铁固定在外壳里面，包围着电枢。在这里电枢由轴承或套管支撑，以便可以自由旋转。从本质上来讲，电枢上的线圈就是电感。如我们以前所学，当电流通过的时候，电感会产生磁场。这个磁场跟永磁铁周围的磁场是一样的。通过控制电枢周围的磁场在什么时候出现，你可以使电线周围的磁场排斥或者吸引磁铁周围的磁场。电枢中的电流将按照能够引起电枢旋转的顺序进行开通和关断（这将使磁场开通和关断），这称为换向。在DC永磁有刷电机中，是靠电刷来换向的。在电枢旋转时，电刷将依次使电枢线圈的不同部分开通电流，另一些部分则

断开电流。

DC永磁电机有两个输入和两个输出。我们输入电压和电流，获得速度和转矩。这种电机的一个有利的地方是，其速度正比于电压，转矩则正比于电流。电机这种器件有个特点，就是不仅其电气部件与相应的物理等效物在本质是相似的，而且电机在性能上是一个真正实现机电相互联系的器件。可以这样来考虑这一点——电压和电流在一块就是功率，速度和转矩在一块也等于功率。因此在电机中，你输入电功率，取出机械功率。这一点其实很有道理，是不是？其等效电路是这样的（如图4-9所示）。



图4-9　DC永磁电机的内部原理

在这个电路中，你认为电阻有什么作用呢？你是否曾注意过电机的发热问题？这个发热就来自电机内部的电阻性部件。任何非超导的电线都有电阻。电枢是电线做的，当然也有电阻。电流流经电阻将在其上产生电压降，因此将消耗功率并转化成热量。欧姆定律在这里仍然起作用！图中的电感则产生使电枢转动的磁场。图中的电池则表示被称作反电势（或电动势）的量。如果你用手去转动电机的转轴，并且线圈上除了一个伏特表之外什么也没有连接的话，那么你将看到一个正比于旋动速度的电压将会出现在电压表上。当我们在电机上施加一个电压时，转轴将按照同样的比例做旋转运动。不过，并不是施加在引线上的所有电压都会被用来产生转速，其中有一部分将损失在电阻上。把所有这些因素都考虑在一起，就可以得到这种电机的特性方程。

电压和速度之间的关系就是所谓的电压常数，其单位是V/（kr/min)，通常用K_e或K_v来表示

$$K_v = \frac{V - IR}{K_{rpm}} \tag{4-1}$$

其中，V是施加在引出线上的电压大小；

I是流经电机的电流；

R是电机的等效电阻①；

K_{rmp}是转轴的转速，单位是kr/min。

以上方程中的IR项代表电机中的发热损耗。当电流趋向于零时，这一项就消

① 注意：当特别缓慢地拨动电枢时，你可用一个欧姆表来测得较接近实际情况的等效电阻（如果转得太快的话，产生的电压将扰乱读数）。如果想更精确，那你必须考虑电刷的电阻以及其与电枢相接触的方式，这将在另外一本书中进行讨论。

失了。前面介绍过的用手转动电机并且只在引线上接一个电压表，从它上面读出产生的电压值就是这种情况。你知道如何利用这个事实来精确测量电压常数K_e，以使误差达到最小吗？

电流和转矩之间的关系称为转矩常数，通常用K_i表示，其单位是in · oz/A（1oz＝28.35g）

$$K_v = \frac{V-IR}{K_{rpm}} \tag{4-2}$$

其中，T为转矩，单位是in · oz；

I为电流，单位是A。

以上这两个常数是相互联系的，改变一个，另一个也跟着改变。事实上，如果你知道的其中一个，你就可以用以下的方程来计算另外一个

$$K_i = \frac{T}{I} \tag{4-3}$$

$K_i = K_v$ [Nm/A; V/rad/s]

$K_i = 9.5493 \times 10^{-3} \times K_v$ [Nm/A; V/(kr/min)]

$K_i = 1.3524 \times K_v$ [in · oz/A; V/(kr/min)]

由此可以看出，在电机中我们实际处理的只有一个常数。这个常数是由电枢上的线圈有多少匝以及磁铁的磁场有多强决定的。线圈匝数增多就会增大电压/转矩常数，反之就会使之减小。电枢的尺寸以及磁铁的强度也影响这个常数。

现在我们已经弄明白了电机的主要电气部件是电阻、电感以及一个电压源。你能够推想出电机的机械性质是什么吗？电机的机械性质就表现为摩擦和惯性①。其中，需要我们注意的一个最重要的因素是负载，或者说是电机的转轴上到底带了什么，它有可能会是电机的摩擦和惯性的主要来源，从而使得电枢的惯量以及电刷和轴承的摩擦变得微不足道。

惯性将使电机的起动需要更长的时间，使加速所需的电流和负载增大。而当电机以一定的速度正常运行时，惯性将试图保持电机旋转，而在减速的过程中，你会看到电机所需的电流少了。

摩擦将在电机上产生一个恒定的负荷，以电气工程师的观点来看，它表现为增加了一个电流分量。为了对电机获得更深入的了解，我建议读者阅读一本“红皮书”②。

① 你也可以如同本书开始所讨论的那样，加入一个弹簧之类的元件，但在DC永磁电机中很少使用。

② *DC Motors Speed Controls Servo Systems*。由于其选择了很有意思的粉红颜色作封面，所以我喜欢称其为红皮书。对于那些与DC电机打交道的人，我强烈推荐这本书。

你也许会问："那个Lego Mindstorms玩具到底怎么样了？"好吧，我告诉你，我和我的儿子们用它搭建了好几个机器人方案，不过我的大儿子已经对它失去了兴趣，因为我们没法搭建一个可以帮他打扫卧室的机器人。我告诉他我衷心地希望他某一天能够解决这个很特别的问题，但一切最终还得他自已作决定。

1. DC永磁电机控制

当我们想控制DC永磁电机的速度的时候，我们应该控制加到它上面的电压。当我们想控制转矩的时候，我们应当控制其电流。由于我们刚刚学习了这种类型的电机，因此我希望这种观点对于你来讲应该是显而易见的。如果你想不到这样做的合理性，那你应该回过头去复习一下DC电机的方程。

（1）速度控制

让我们从一个简单的应用开始。假设你想让电机在500r/min下运行。电机的K_v是10V/kr/min。将其代入我们刚刚学过的方程，你会发现为了获得所需的速度，你需要大约5V的电压（暂时忽略负载）。但是你怎么给电机输入5V的电压呢？有两个不同的方法解决这个问题。一个是线性的方法，一个是开关的方法。在两种情况下，你都得从一个高于电机所需电压的电压值开始，然后降低它，最后再加到电机的引线上。我们将分别介绍这两种类型的系统，以理解它们的优点和缺点。

（2）线性控制

进行线性控制最简单的方法是基于分压器原理。在电源和电机之间放一个电阻，并调节电阻的阻值，直到电机两端的电压变为你所需要的数值为止。如图4-10所示。



图4-10　串联一个电阻的电机

这个设计的最大缺点源自电机是个动态负载的事实。当电机的负载变化时，通过电机的电流跟着改变，根据欧姆定律，电阻上的压降将改变，因而会改变电机两端的电压，最终引起电机速度的变化。

然而，如果负载是恒定的，或者变化是可以接受的，那么你可以采用这个方案并使其很好地工作。需要注意的是，电阻将因有电流通过以及两端有电压而发热。例如，若V_{cc}为10V，那么根据电机需要的电压是5V来确定电阻的阻值，这时电阻上将有5V的压降。如果电机的电流是1A，那么你需要一个5W的电阻才能承受这个发热功率（事实上，任何称职的工程师都会给功率电阻留一定的余地，而不会让其运行在最大的标称瓦数之下）。

在这个线性控制方案中，电阻可以用一个FET或一个晶体管或其他运行在线性模式的放大器来替代，以使加在电机上的电压可以调节。使用前面学过的反馈方

法，还可以实现对负载变化的补偿，从而维持所需的输出电压（如图4-11所示）。

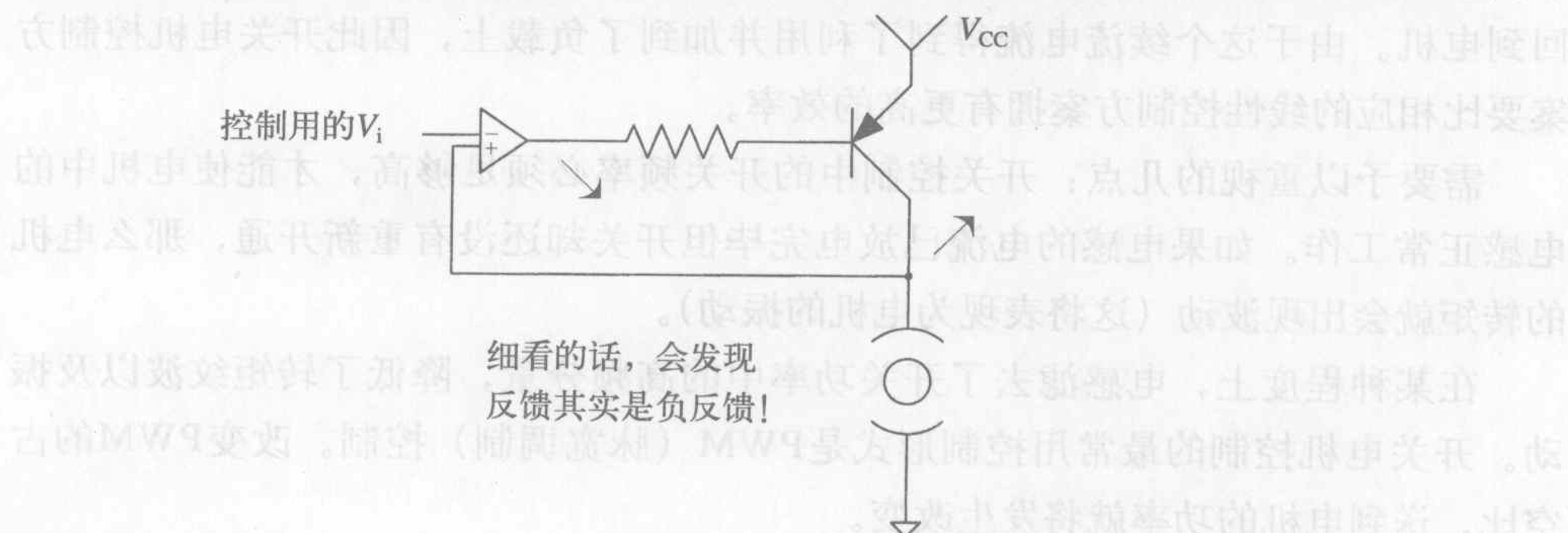


图4-11 运放控制的电机

图4-11的这个设计同前面的相比具有显著的优点，它可以将电机的电压维持在希望的水平而不会受到负载变化的影响。因此同前一个设计相比，它能够维持更为恒定的速度，不过在后面我们会看到，这里仍然有改进的余地。

这个设计的最大缺点与电阻的方案相同：额外的功率被转化成了热量。不过有一个好处，就是当考虑电磁干扰（EMI）的时候，它是一个很“安静”的设计。

(3) 开关控制

与线性控制相反，电机也可以采用断开/开通电源的方法，来进行开关控制。开关电机控制与开关电源有许多相似之处。在开关电源的许多场合，你会发现有一个电感，当开关闭合时它储存能量，当开关断开时它将能量放电到负载上。在开关电机控制中，也有类似的情况发生，只不过在开关电机的情况下，电感是位于电机的内部。在开关电源的情况下，你会发现有一个二极管把来自电感的电流引向负载。在一个设计正确的开关电机控制中，也有一个二极管在担负着同样的工作（如图4-12所示）。

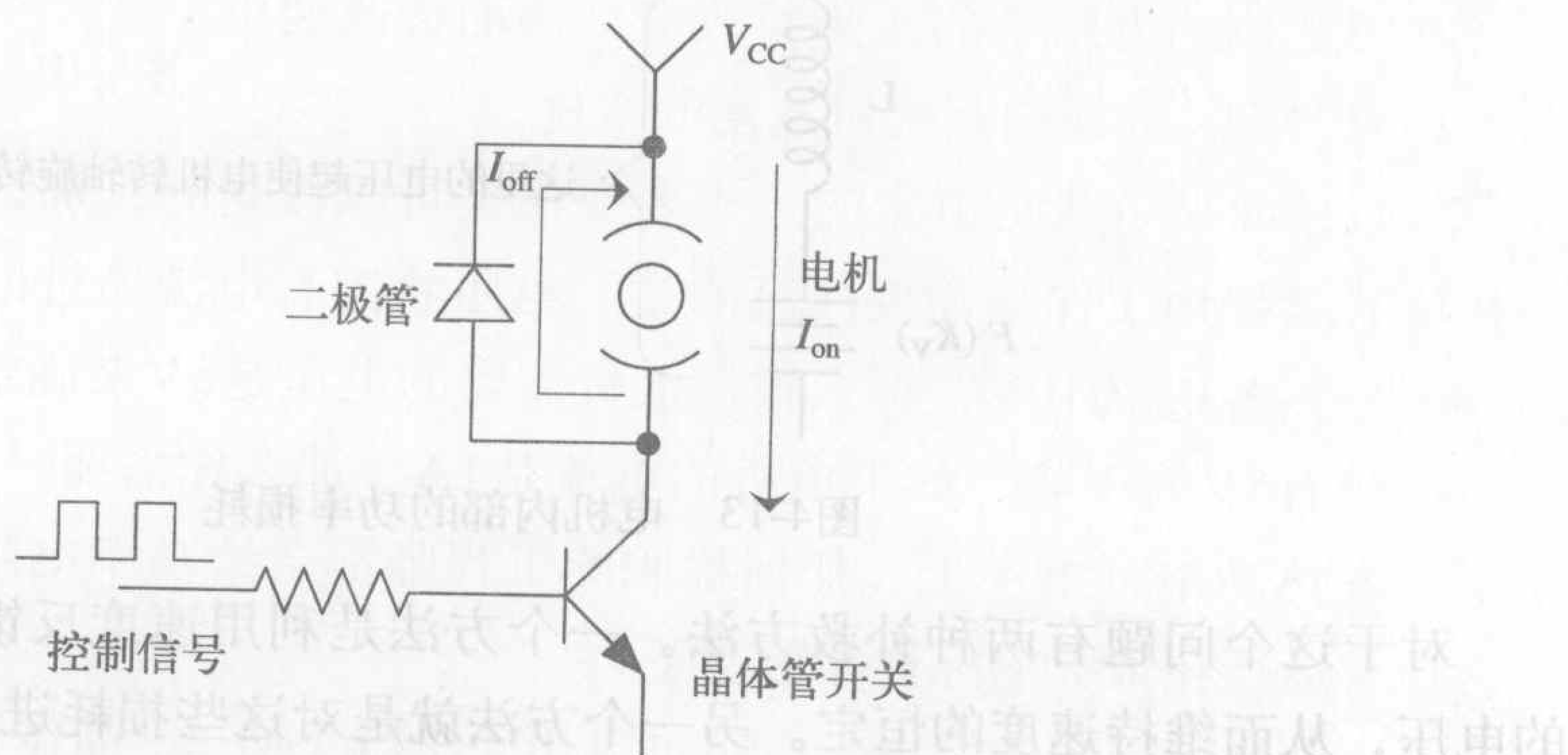


图4-12 采用晶体管和二极管构成的开关电机控制

当开关闭合时，电流流过电机；当开关断开时，电感的电流经续流二极管返回到电机。由于这个续流电流得到了利用并加到了负载上，因此开关电机控制方案要比相应的线性控制方案拥有更高的效率。

需要予以重视的几点：开关控制中的开关频率必须足够高，才能使电机中的电感正常工作。如果电感的电流已放电完毕但开关却还没有重新开通，那么电机的转矩就会出现波动（这将表现为电机的振动）。

在某种程度上，电感滤去了开关功率中的高频分量，降低了转矩纹波以及振动。开关电机控制的最常用控制形式是PWM（脉宽调制）控制。改变PWM的占空比，送到电机的功率就将发生改变。

开关电机控制在目前是相当流行的。

(4) 速度维持

在电机控制中，通常会使用某种形式的电压反馈，来使被控制的输出电压维持在所需要的水平。记住在直流永磁电机中，输出轴上的速度同所施加的电压成正比。可以利用这个特点来使电机的速度维持恒定。不过，如果你往回翻几页书，你会发现电机方程中代表损耗的*IR*分量。这个损耗将在电机电枢的导线电阻上转化为热量（电刷上也会有一点）。损耗正比于通过电机的电流平方，而电流则正比于电机转轴上的负载。

这就意味着，当电机的负载变化时，损耗也会变化。这将进而导致速度的变化。这一点可以这样来理解：引起发热的那部分电压根本就没有起到使电机的转轴转动的作用（如图4-13所示）。

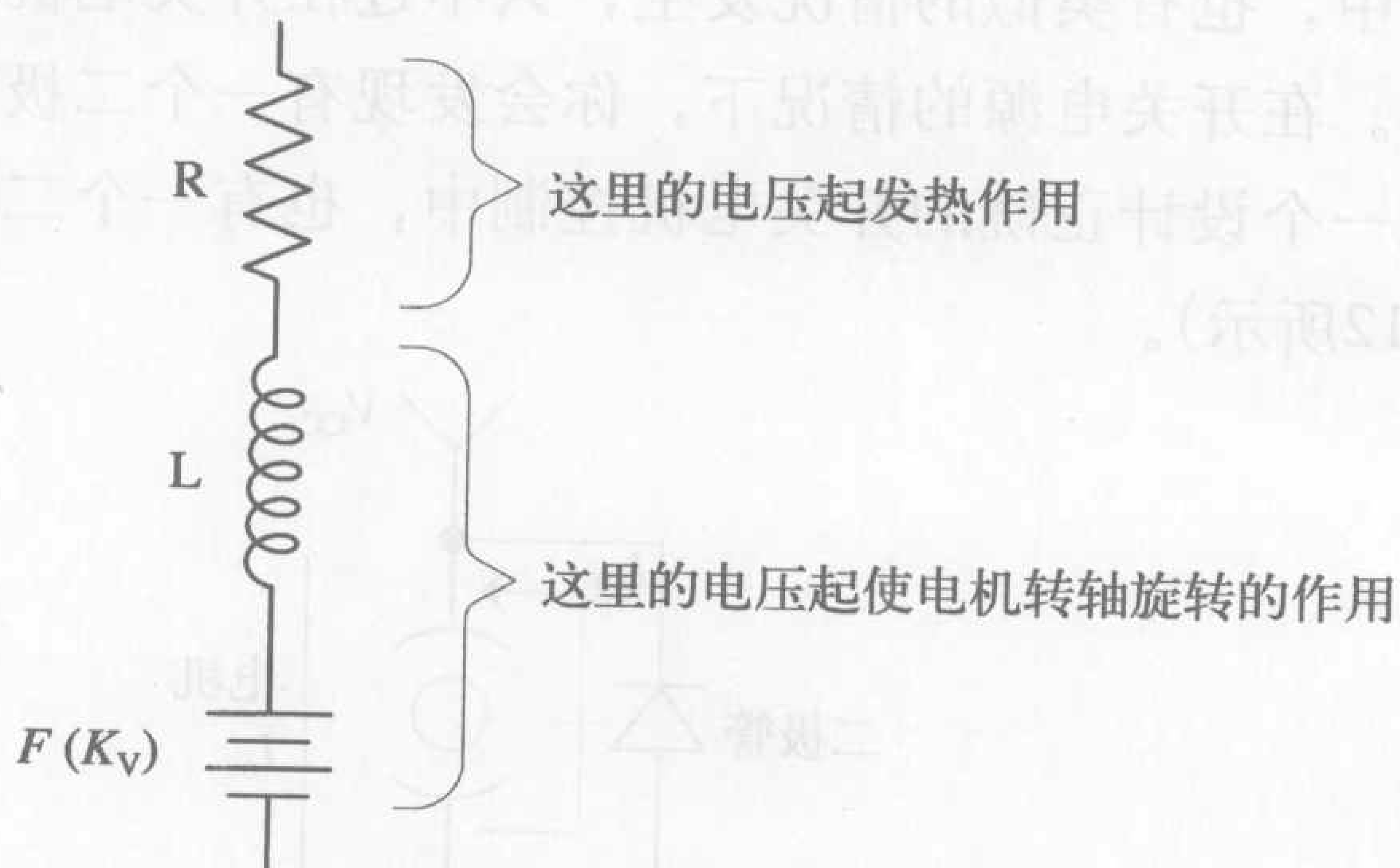


图4-13　电机内部的功率损耗

对于这个问题有两种补救方法。一个方法是利用速度反馈来调节输送到电机的电压，从而维持速度的恒定。另一个方法就是对这些损耗进行补偿。

在大多数的直流电机控制方案中，你会发现有一个电压反馈环，它可以完成

90%的速度控制任务。在这个环的外部，你将发现一个速度反馈控制环，它将对速度变动的其余部分进行补偿（如图4-14所示）。

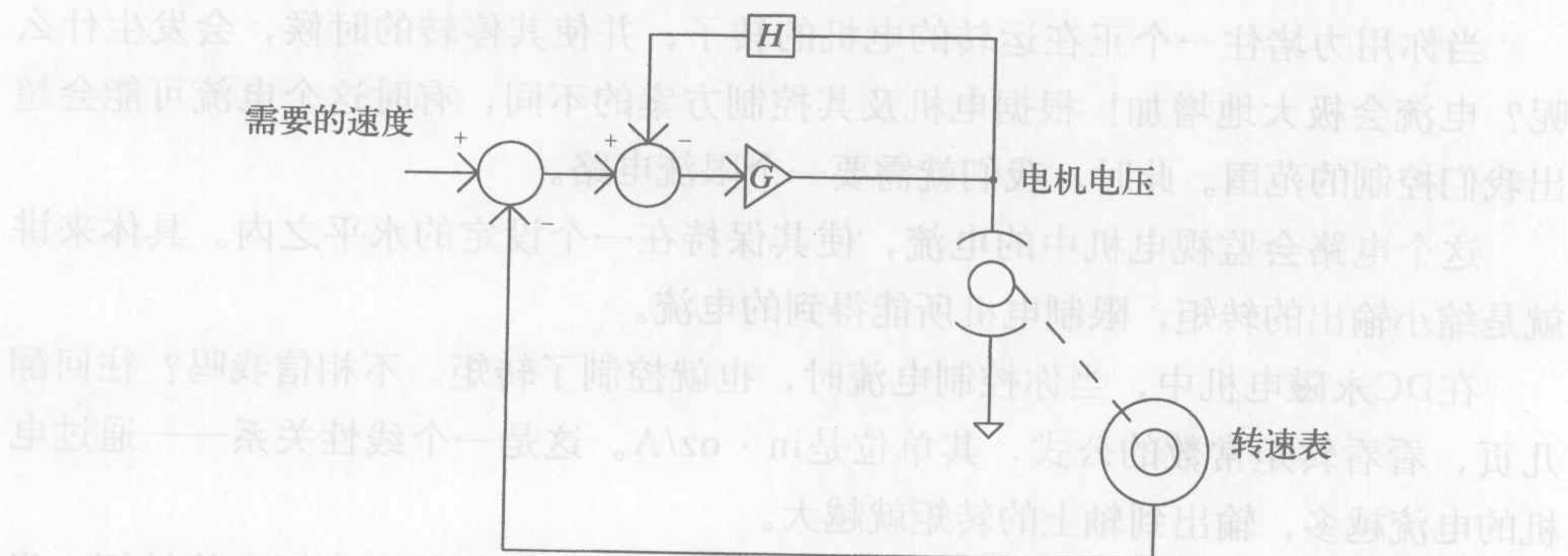


图4-14　速度反馈的原理图

尽管把我们想控制的信号反馈回去是一个很好的想法，但有时我们可能没有这个条件，或者有其他理由而不想使用速度反馈。如果是这样的话，我们可以使用另外一个近似的速度控制方法，即所谓的*IR*补偿（如图4-15所示）。在这种方法里，我们通过感测流经电机的电流来监测电机上的负荷。引起发热的这个损耗压降是跟电流成正比的。如果我们知道电机的这个电阻有多大，就可以计算出到底有多大的电压消耗在了发热上（而没有起到驱动转轴的作用）。在电机的输入电压上增加这么一个电压分量，我们就可以得到相当好的速度控制而无需使用转速表！

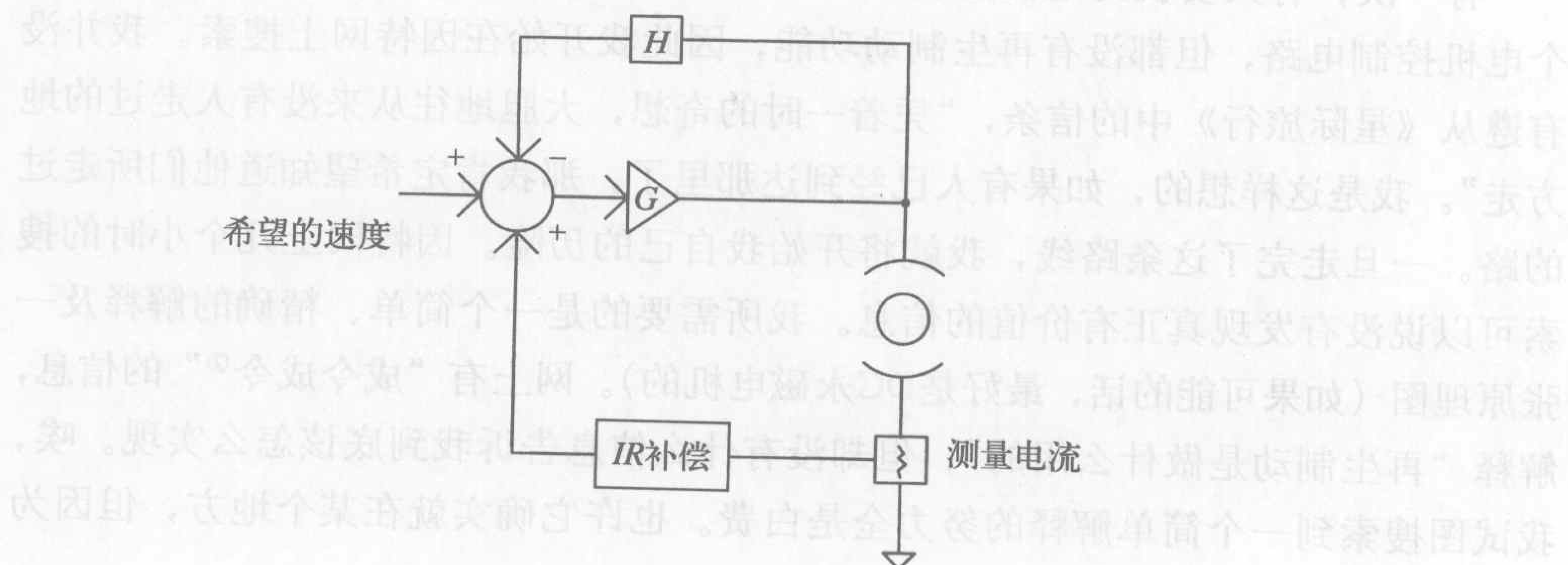


图4-15　IR补偿反馈的原理方块图

总之，控制DC永磁电机的速度是我们能够遇到的最简单的运动控制问题之一。不过这里的“简单”只是相对于运动控制的其他类型而言的，其实它仍是需要我们吃力地吞下去的一块大骨头。出于这个原因，对于那些想学习运动控制的读者，

我建议他们在进行其他电机的控制设计之前，先从这里开始。

(5) 转矩控制

当你用力堵住一个正在运转的电机的转子，并使其停转的时候，会发生什么呢？电流会极大地增加！根据电机及其控制方案的不同，有时这个电流可能会超出我们控制的范围。此时，我们就需要一个限流电路。

这个电路会监视电机中的电流，使其保持在一个设定的水平之内。具体来讲就是缩小输出的转矩，限制电机所能得到的电流。

在DC永磁电机中，当你控制电流时，也就控制了转矩。不相信我吗？往回翻几页，看看转矩常数的公式，其单位是in · oz/A。这是一个线性关系——通过电机的电流越多，输出到轴上的转矩就越大。

这就意味着，当给电机带负载时，供给恒定的电流就将产生恒定的转矩。当你的控制达到电流的极限值时，所发生的事情在本质上也是如此。此时控制将从恒电压控制转变成恒电流控制。这将保护电机和控制电路免受损坏。

(6) 制动

想象一下你驾着电动踏板车从山岗上滑落下来的场面。你一定会对自己说："唉，要是能够把我正在浪费的能量的一部分利用起来，以降低速度该多好啊！应该有办法让它给电池充电。我是一个工程师，我为什么不设计一个再生制动电路呢？"这种念头也曾在我的脑海里浮现，但我很容易忽略这种在脑袋里一闪而过的想法[①]，直到现在都是如此。

有一次，有人要我为电机控制设计一个再生制动电路。我以前已经做过好几个电机控制电路，但都没有再生制动功能，因此我开始在因特网上搜索。我并没有遵从《星际旅行》中的信条，"凭着一时的奇想，大胆地往从来没有人走过的地方走"。我是这样想的，如果有人已经到达那里了，那我肯定希望知道他们所走过的路。一旦走完了这条路线，我就将开始我自己的历险。因特网上几个小时的搜索可以说没有发现真正有价值的信息。我所需要的是一个简单、精确的解释及一张原理图（如果可能的话，最好是DC永磁电机的）。网上有"成令成令[②]"的信息，解释"再生制动是做什么用的"，但却没有什么信息告诉我到底该怎么实现。唉，我试图搜索到一个简单解释的努力全是白费。也许它确实就在某个地方，但因为

① 我发现自己很容易忽略我在玩任天堂游戏时产生的这类想法。事实上，回想起我在大学的日子，由于严重的任天堂游戏瘾，我不得不整整重修了一个学期的课程（除一门"said topic"课程因我提交了一篇很有说服力的论文通过之外）。不过这个话题将留待其他时候再说。

② 在指互联网的时候，你能用"令"吗？不管怎么说，它并没有真的写在纸上，是不是？（注：令（ream）是纸张的计量单位，一令纸等于500张）。

我讨厌那些弹出广告而错过了吧！

你可能已经猜到了，我把无法在网上找到自己需要的东西看成是对自己的羞辱，因此我必须改变这种情况。下面就是我自己拼凑出来的一个方案，我已经按照自己的智力水平尽力对其进行了浓缩（我在管理层呆的时间越久，似乎这种智力水平就越低）。现在我以一种容易理解的方式，把它展示在读者的面前。这个方案是在我看了有史以来最好的一些想法、并且参考了本田Insight混合动力车的再生制动方案以后，设计的一个方案。

① 简单的秘密

我找到的一份资料说，再生制动是电机控制中保护得很好的一个秘密。不过当我知道真相的时候，我认为它并不是什么秘密，只不过是解释得不好罢了。现在就让我们从DC永磁电机的简单PWM控制器的原理图入手介绍吧（如图4-16所示）。

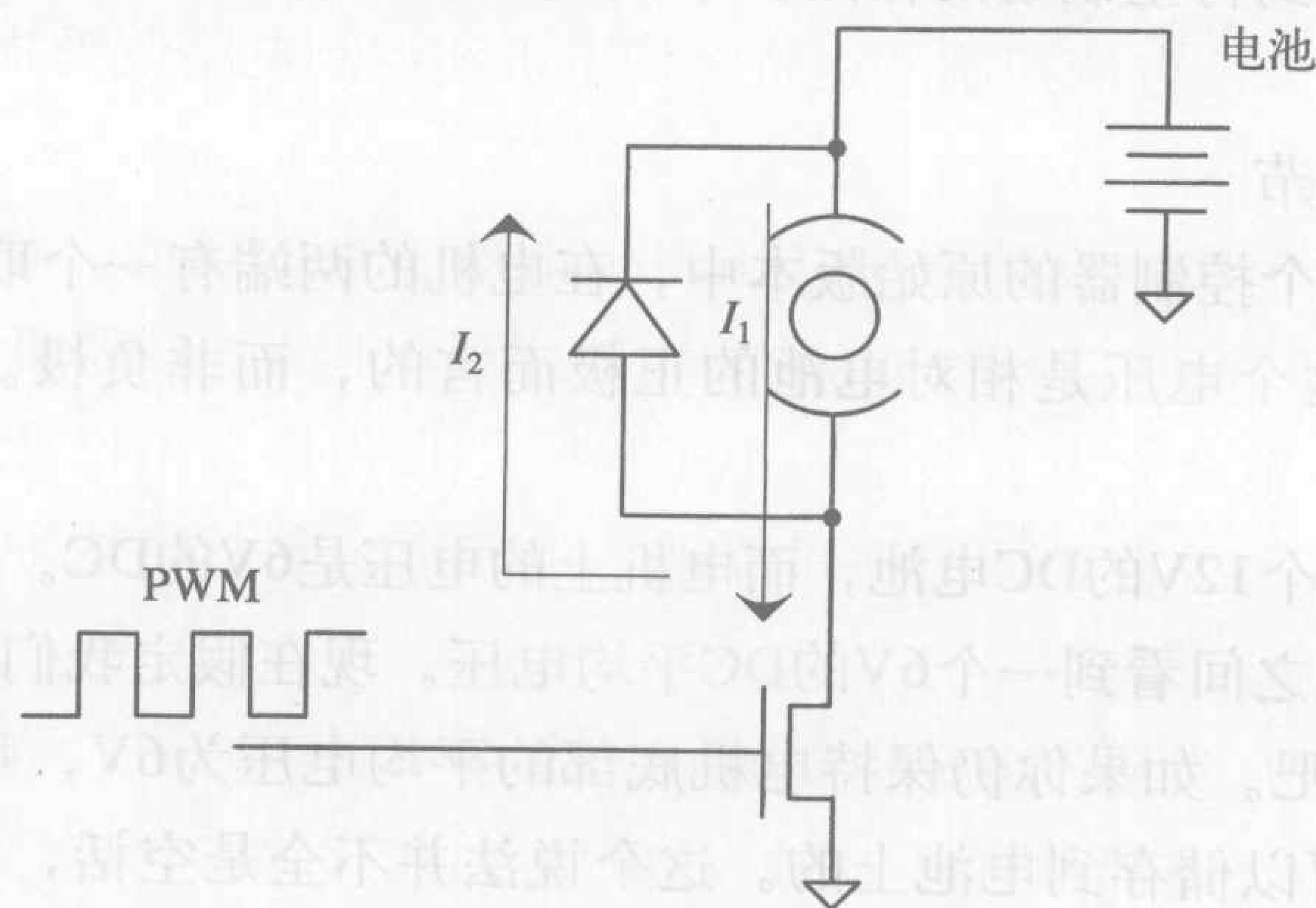


图4-16　PWM电机控制

在图4-16中，一个PWM信号被送入一个开关，譬如一个MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，金属氧化层半导体场效应管），其频率应该足够高，足以保证电机电感中的电流连续。这同开关电源有一定的相似之处。在PWM信号断开期间，电流经过二极管，这称为续流。面对这个电路，我时刻问自己的一个问题是：当电机旋转在一个比电池的输出电压还低的电压之下的时候，我们怎样才能让电机把电流送回到电池呢？

让我们对上述电路做一点小改动。我们用一个同步整流开关来替换上面的二极管，该同步整流管应该在主开关开通时断开，而在主开关断开时开通（如图4-17所示）。为了简化讨论，我这里不考虑两个FET管都需要配置专门的驱动这个不足之处。

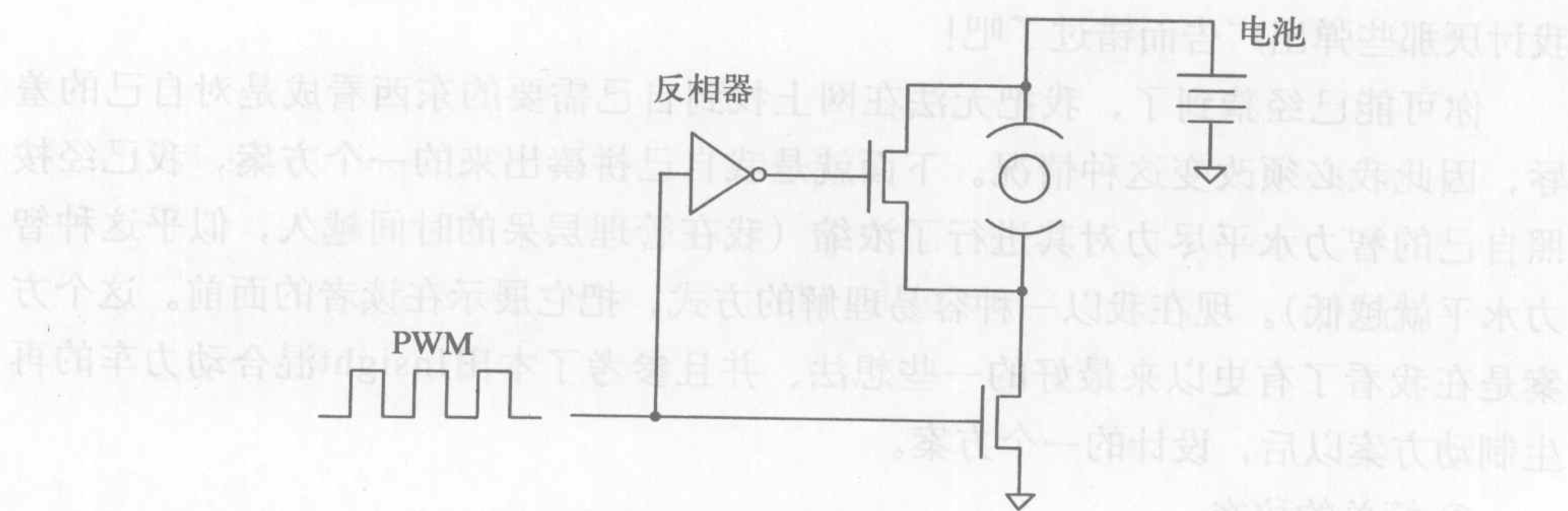


图4-17　用FET替代二极管的PWM电机控制电路

这个拓扑我曾经看过很多次，它通常被用来提高控制器的效率（考虑的是降低发热损耗），这是因为FET的管压降要比二极管低得多。我当时一直没有意识到这个电路还能起到再生制动的作用。下面我们就来看看它是如何起再生制动作用的。

② 一个小细节

还记得在这个控制器的原始版本中，在电机的两端有一个取决于PWM占空比的电压吗？但这个电压是相对电池的正极而言的，而非负极。这一点帮了我的忙！

假定我们有个12V的DC电池，而电机上的电压是6V的DC。这意味着我们将在电机的底部与地之间看到一个6V的DC平均电压。现在假定我们将电机转动得快过6V，例如说7V吧。如果你仍保持电机底部的平均电压为6V，那么你就将多出1V的电压，这是可以储存到电池上的。这个说法并不全是空话，我认为它可以把我们带入到正确答案上。不过，若你能够理解并接收这种观点，那你也许会以为二极管的版本也一样可以再生制动，但实际上它却不行。

让我们来看具体的细节。在二极管的版本中，是不会产生制动力的，制动力只有在用FET替代二极管以后才会出现！当续流FET开通时，电机产生的电压被短路回到了它自身。这就提供了一个制动力和一个反方向通过电机的电流（注意FET是电流可以双向流通的器件）。还记得电感法则（因为在电机中有一个尺寸变小了的电感）吧？一旦有电流流过其中，它就不愿意这个电流停下来。因此当上端的FET开路、下端的FET闭合时，电流就被推入了电池，你也就实现了再生制动。

③ 再生制动并不是太难

事实证明，再生制动一点儿也不难实现。其实，它只能算做是提高电机控制器效率的一个附带好处而已（如果你愿意这样看的话）！要是有某种方法可以做

到100%的效率，那该多好呀！

(7) 改变转向

在DC永磁电机中，改变电枢的转向是很容易的。你只需将接到电机引出线上的电压反一下就行。通常采用所谓的H桥来完成这个工作。之所以有H桥这个名称，是因为将其画在纸上时，看起来就是H的形状（如图4-18所示）。

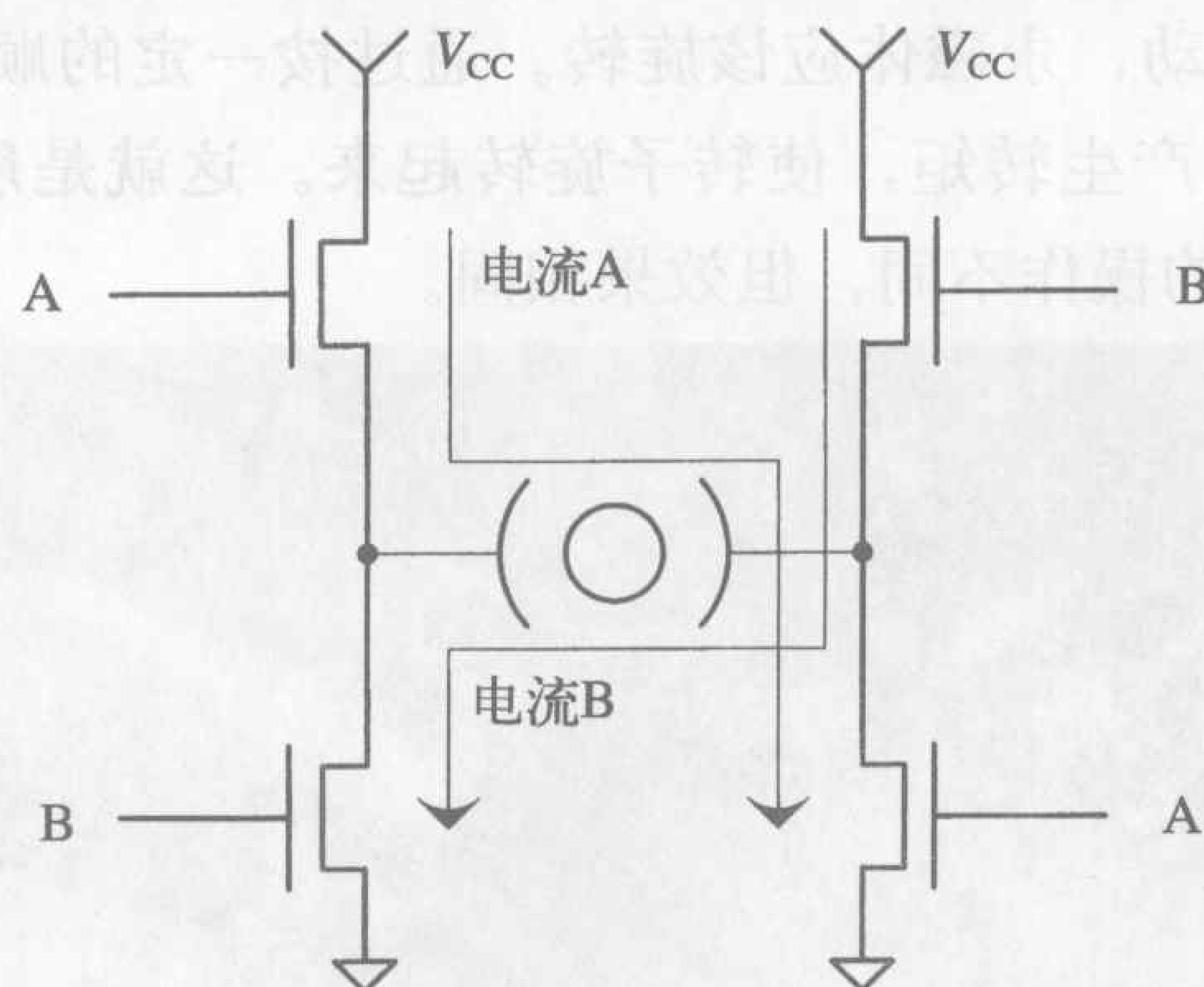


图4-18　H桥电机控制

根据前面的讨论，H桥既可以用于线性控制，也可以用于开关模式控制。在两种方案中，原理也还跟前面介绍的相同，只是具体的情况变得更加复杂了。例如，我们不应该同时开通H桥同一边上下的两条腿臂，因为这将导致电源短路。这种短路情况称为直通（shoot through），会放出大量的“魔烟”。

只要所用的器件恰当（譬如用FET），位于对角线上一高一低的两条腿臂上的同步开关就会实现跟前面的方案相同的再生制动效果。

在H桥驱动中，由于电机的引出线再也不是总接在同一个地方，因此电压和电流的反馈变得更为复杂。

(8) 结论

电机控制是我们在电气工程中将会遇到的最复杂、最值得做的事情之一。当你看到某样物体动起来的时候，你付出的所有努力及受到的任何挫折就都得到了回报。在本书里，我没有办法覆盖电机控制的所有方方面面，但我希望你已经对基础有了足够充分的理解，在你将来需要处理电机控制相关的事情时，或者在你需要做进一步的研究时，能够理解其中遇到的相关问题。

2. 其他DC电机

你将遇到各种各样的电机。自从电进入到人们的日常生活以来，人们就一直在想各种办法开发新的电机。以下是对各种DC电机的一个概述。

（1）无刷DC电机

无刷电机是前面讨论的DC永磁电机的近亲，但它不使用电刷换向，而采用某种电子控制。为了实现这个目标，通常将永磁体放在电机内部的一侧（在DC永磁电机中，这个地方是放置电枢的），即转子上。绕组则在另外一侧，即定子上，这也称无刷电机的磁场绕组。如图4-19所示。这并不是说一定要永磁体在里、绕组在外，但绕组应该固定不动，永磁体应该旋转。通过按一定的顺序来接通和断开定子绕组，从而在转子上产生转矩，使转子旋转起来。这就是所谓的电子换向。这跟前面所学的电刷换向的操作不同，但效果相同。

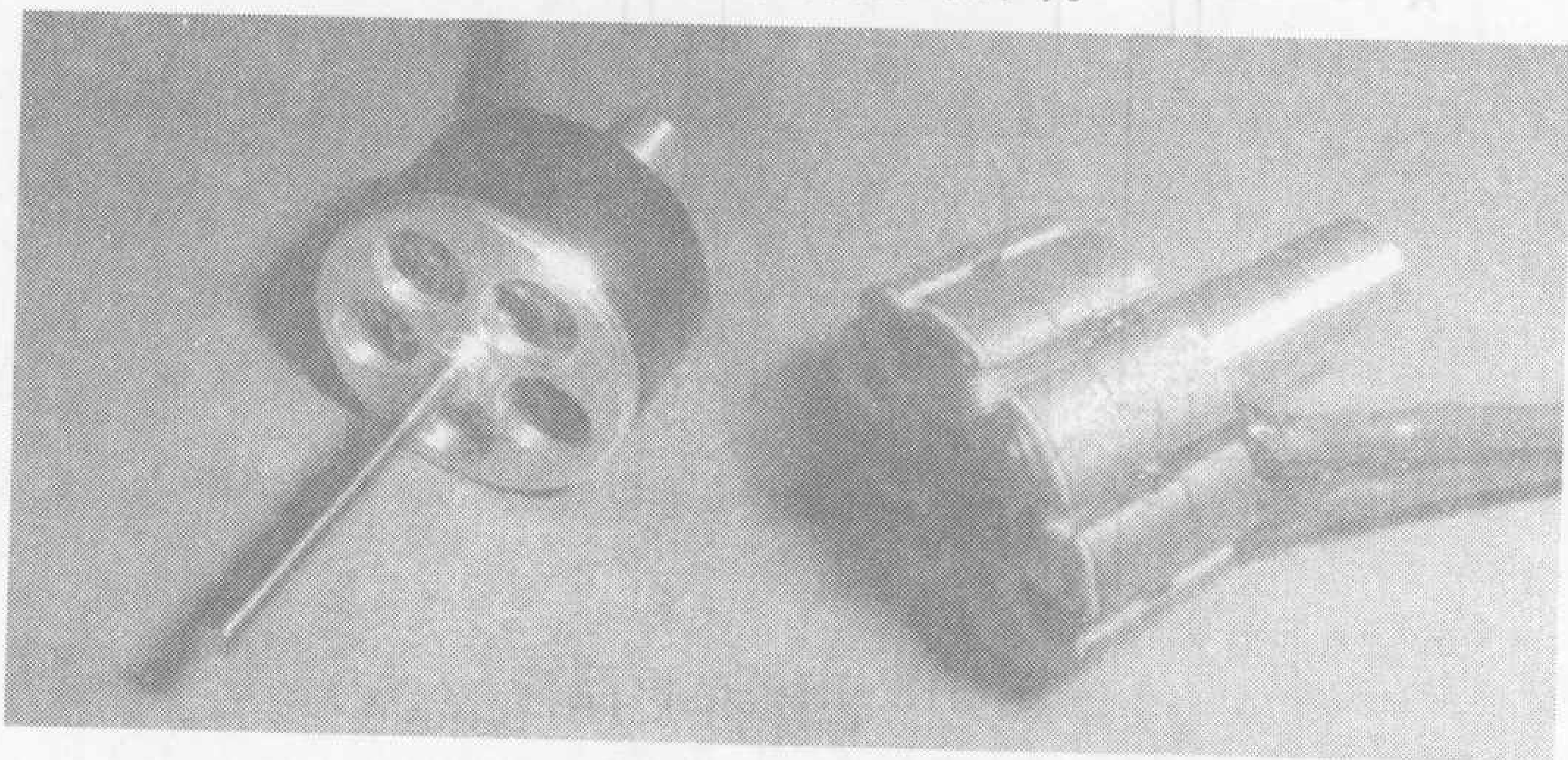


图4-19　从我的遥控小飞机里拆下的小型无刷DC电机

常常会有人告诉你，无刷DC电机比起有刷DC永磁电机来，是如何如何的高效。其实这里面有个需要揭穿的骗局。尽管他们所说的可能是对的，但是高效率并非（如他们所告诉你的那样）完全由于无刷的缘故。你会看到一个效率的提高数值，但这通常源自所选磁铁的贡献。大多数的无刷电机采用稀土磁铁，它们比更常使用的陶质铁氧体磁铁拥有高得多的磁密。这样一来，对于同样的转矩和速度，所需的导线匝数就少得多。导线匝数少就意味着导线较短，因而电阻较小。由于绕组电阻是电机中比重最大的损耗，因而提高了效率。

DC永磁电机通常使用陶质铁氧体磁铁，因此需要更多的导线匝数。为了使其效率更高，你必须增大导线的直径、降低其电阻。在DC有刷电机中也可以使用较强的磁铁。这种材料最常见于业余爱好者商店。那里出售的遥控小飞机上用的某些很酷的DC有刷电机，采用的就是这种强磁铁。在采用了“超强”磁铁以后，这些DC永磁电机的效率如果不比DC无刷电机高的话，起码也很接近于DC无刷电机的效率。在轴承良好的情况下，电机损耗的第二个来源就是换向。在DC永磁电机中，换向是通过电刷与换向片的接触来实现的。这种接触不是理想的，会产生电阻损耗。在DC无刷电机的场合，换向是采用FET之类的硅开关来实现的，通常至少需要6个FET换向开关部件。这些FET部件有一个电阻性的分量（RDS_{on}），它也

将引起损耗和发热。

无刷电机的最大优点表现在它的名称，它没有电刷。DC永磁电机中的电刷几乎总是最先损坏的部件。电刷本来就是设计出来供磨损的，但要注意不要让它影响到电机的使用。有刷电机的种类很多，各有各的用途。

就无刷电机来讲，有一点需要注意，就是其控制器更为复杂，它所需的功率器件是有刷电机控制的3~6倍。不过一旦你实现了对它的控制，那么使其往两个方向旋转所要做的工作也就完成得差不多了。因此如果需要正反向旋转的话，那么无刷电机是一个更好的选择。

(2) 步进电机

步进电机作为一种DC电机，其特点在于，每当你给它的一个绕组通电，它的输出（转子）就移动一个特定的距离。它是无刷电机以及开关磁阻电机这个"怪物"①的近亲。步进电机能够移动一个特定距离的能力，使得其常被用在定位机构中。打印机就用它来带墨盒负载。

对于步进电机来讲，定位是相对较为容易的事情，因为你可以通过给绕组通电并计算通电的步数来确定电机的转轴在什么位置。

步进电机的性能用移动转矩和保持转矩来表示。知道这一点十分重要，因为无论你的负载超过了其中的哪一个，电机都可能会发生滑移从而导致你记录的步数作废。

经验法则

- 线性控制引起的EMI少。
- 线性控制简单且便宜。
- 线性控制发热严重，效率较低。
- 开关控制效率更高。
- 开关控制引起较多EMI。
- 开关控制通常更复杂更昂贵。
- 恒定电压产生恒定速度。
- 恒定电流产生恒定转矩。
- 在开关操作中不要忘记续流二极管。
- 用FET代替续流二极管，你就得到了制动能力。
- 利用H桥变更转向。

---

① 开关磁阻电机介于交流电机和无刷DC永磁电机之间。要想让读者仅凭自己拥有的资料，去弄懂开关磁阻电机如何工作，这恐怕会有一定的难度。

- 无刷电机控制是内在双方向的。
- 步进电机按小步距或增量移动。

4.3.2　交流及通用电机

在很久以前有一个叫特斯拉的人，他帮助了我们所有的人，是他让大家相信，我们所需要的是交流配电系统，而不是爱迪生所说的DC就地发电机。在这场辩论中起了重要作用的一个关键因素，就是特斯拉发明的交流电机。

交流电机的种类很多。在这里我将给大家介绍其中最常用的交流感应电机。

交流感应电机通过变化定子上产生的磁场，来在电枢（转子）中感应出一个电流。电枢中感应出来的这个电流也会产生一个磁场，它与定子的磁场相互作用（磁极的吸引或排斥），从而引起转子的旋转。当我第一次学习这个原理的时候，我觉得这个原理似乎是在讲“感应电机能够自己把自己提起来”，真的觉得有点不可思议。从这个原理可以得出这样一个结果，即感应电机有一个“最佳射点”，该处产生的转矩最大，速度很高很好。而在低速下，感应电机的转矩下降得特别快，因此低速下不使用感应电机（这跟DC电机很不相同）。此外，感应电机还需要由正弦交流电源来供电，这使得绝大部分的感应电机是定速输出的电机（其速度取决于交流电源的频率）。有一种所谓的变频驱动技术，它在结构上有点类似DC无刷驱动，它可以将频率变化的电压输入到感应电机，从而实现感应电机的变速驱动。由于感应电机转矩－速度曲线不是简单的直线，因此这样的控制相当复杂，通常需要使用DSP（数字信号处理器）芯片来处理所有的数学运算，才有可能获得我们所需要的性能。

交流电机自发明以来就一直在广泛使用，它们相对便宜，而且由于没有电刷，因而可以使用很长的时间。交流电机也可以做成跟步进电机一样的同步电机，在这种情况下，我们可以算出电机在每一个交流电源周期中所转过距离。我们可以在各种地方看到交流电机的应用，从冰箱的压缩机驱动，到冰箱中制冰电路的定时，都有交流电机的踪影。在二极管发明之前的年代里，成百万的时钟使用的都是交流（同步）电机。

通用电机在结构上类似永磁电机，但没有永磁体。它的外磁场采用绕组通以电流来产生，而不用永磁体。它之所以被称为通用电机，是因为它的绕线方式特别，既可以使用交流电源，又可以使用直流电源。为了弄明白这一点，我曾把废旧的挤奶棚里的一个电机拆了下来，进行了重新绕线，其间我被电击了不止一次。

电机有各种各样的形状、尺寸、类型以及电压等级，实在难以一一介绍。我

只希望这里所提供的背景信息，能够让大家在遇到相关的问题时起码可以表现得更机灵一点，我也就满足了。

4.3.3 螺线管（solenoid）

螺线管是一种可动电磁设备，它通常只有两个可移动的位置。类似步进电机，螺线管的性能采用保持力和移动力来表示。

螺线管的原理可以用图4-20来说明。在铁棒上缠绕一个线圈（不要太紧），当给线圈通电时，由于磁场的通过，铁棒会自动对齐到线圈的中心。这是因为铁棒“不乐意”（reluctant）离开自己温暖的安乐窝——那“安逸”的小线圈。铁磁材料倾向于同磁场对齐的这种性质，被称为磁阻（reluctance）。

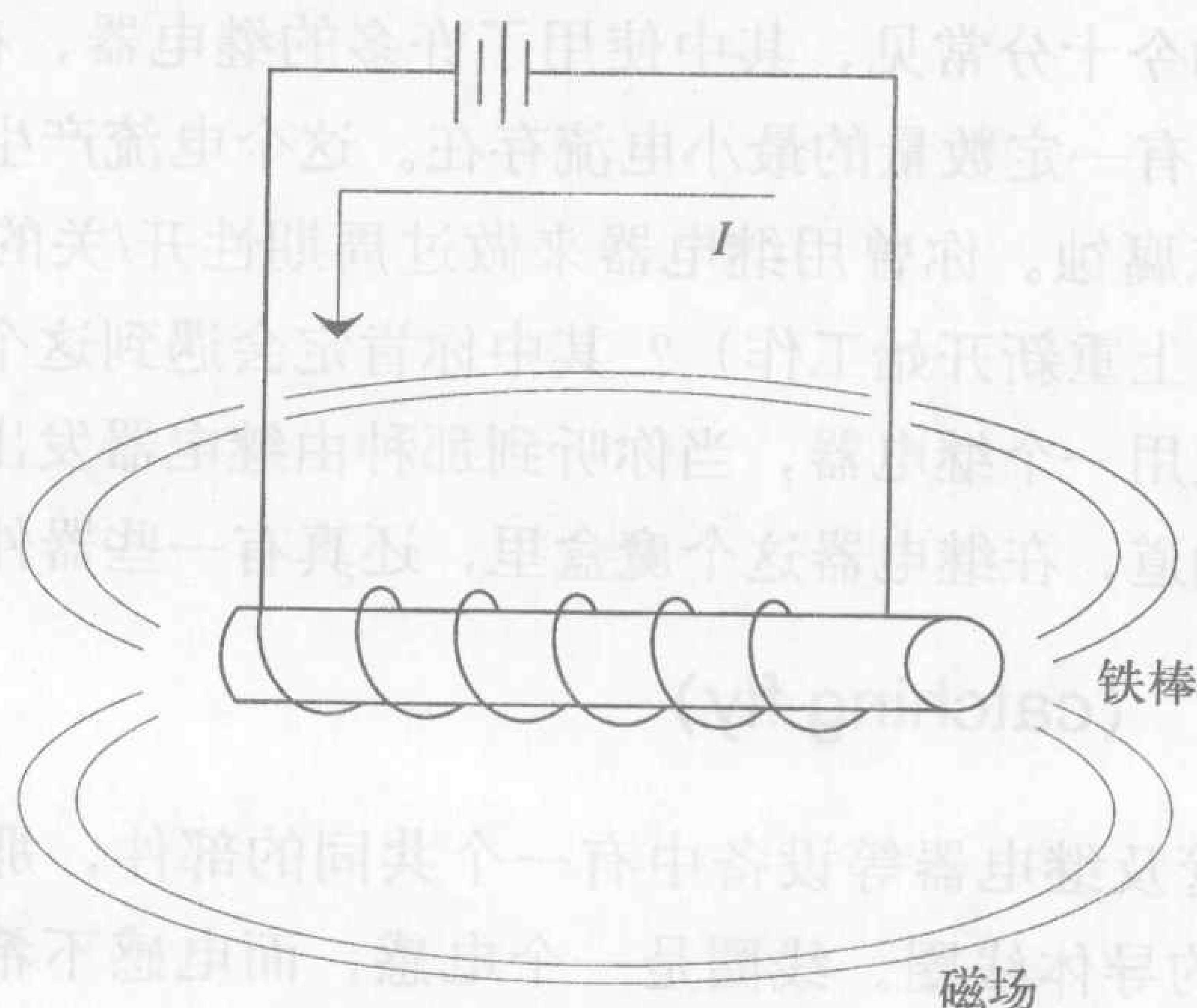


图4-20 线圈中的铁棒

切断磁场后，铁棒又可以很轻松地移动。通常会在铁棒的某一端系一根弹簧，以便在线圈未加电的时候，可以将铁棒从“安逸”的线圈外壳中推出来。而当加电的时候，铁棒仍然会返回到线圈的内部，以显示其磁阻的存在。

当我们需要基于电子控制方式的短程直线运动时，螺线管提供了一种很好的实现方案。此外，螺线管也是电磁炮的基础。电磁炮是很奇特的武器，只可惜我们没有足够的篇幅在这里予以介绍。

4.3.4 继电器

继电器实际上不会引起任何别的物体运动，它的功能在于让内部的部件去闭合一个开关。因此，在这里介绍继电器似乎有点不合时宜。然而，继电器在本质上确实是机电器件，除此之外，我再也找不到更合适的地方来介绍它了。继电器

是一种用途很广的器件。在晶体管发明之前很早就出现了，但是到现在还在使用，就足以说明一些问题。继电器基本上是由一个螺线管和开关组合构成的。根据应用的不同，有的继电器利用磁场来闭合开关，有的则利用磁场来断开开关。继电器上通常有些标签，用来指明操作继电器的线圈，它们包括NO、NC和C。这些缩略词有时也可以在某些开关上见到，它们分别表示“常开”（normally open）、“常闭”（normally closed）和“共点”（common）。“常开”和“常闭”用以表示线圈未通电时开关的状态。“共点”则是同时连接到这两种状态的一个连接点。

继电器有两个很重要的参数，一个是线圈的电压，另一个是触点的定额。如果驱动的电压过低，你也许能够让开关闭合，但却没有保障。触点的定额常用最小电流和最大电流来表示。大多数工程师都会注意最大电流，但往往忽视了最小电流这个参数。动力调整如今十分常见，其中使用了许多的继电器，在断开开关的时候，这些继电器往往要求有一定数量的最小电流存在。这个电流产生一个电弧，可以清洁触点，并防止触点腐蚀。你曾用继电器来做过周期性开/关的工作吗（在其中继电器停一会之后又马上重新开始工作）？其中你肯定会遇到这个参数。自己去做一个设计吧！在里面使用一个继电器，当你听到那种由继电器发出的令人满意的滴答声的时候，你就会知道，在继电器这个魔盒里，还真有一些器件在工作呢。

4.3.5　“捕蚊子”（catching fly）

在电机、螺线管及继电器等设备中有一个共同的部件，那就是在某个地方存在着用来开关电流的导体线圈。线圈是一个电感，而电感不希望电流变化，是不是？那么当你断开一个电感中的电流时，会发生什么呢？在断开电流时，随着磁场的消失，会产生一个很大的尖峰电压。这个尖峰电压有时被称为反激（fly-back）。为了防止这个尖峰电压损坏器件以及为了利用电感中的能量，大多数的应用都会在产生尖峰电压的电感上反向并联一个反激二极管或称续流二极管（如图4-21所示）。

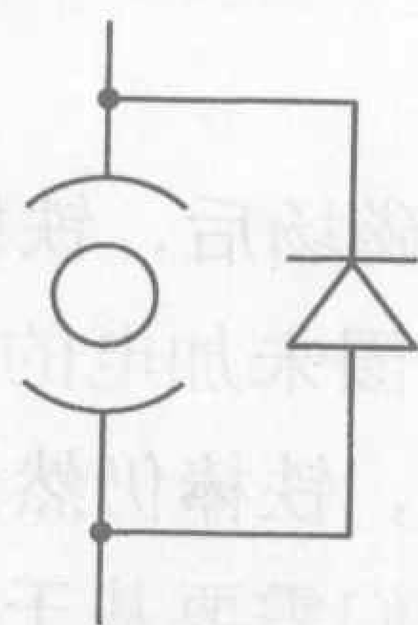


图4-21　电机两端接反激二极管的例子

在图4-21的电路中，如果LR响应比开关频率慢，那么二极管将起到滤波器的部分功能，它可以维持电机中的电流连续。它将使电机电流的变化变得平滑，因而使转矩的变化变得平缓。（还记得转矩是怎么同电流成正比的吗？）

在另外一些情况下，这个二极管的作用也许仅仅是为了捕获瞬变的信号，以防止电路的损坏。如图4-22所示是采用二极管来对继电器电路进行保护的例子。

现在你应该看明白了，在使用反激二极管以后，电压尖峰（或称感应反冲、

反电势）就再也不会超过－0.7V了，因为一旦达到－0.7V，二极管就将被正向偏置，电流就会通过其中并流回到电感的另一端。现在你该知道如何用二极管来制作"捕蚊器"（fly catcher）了吧！

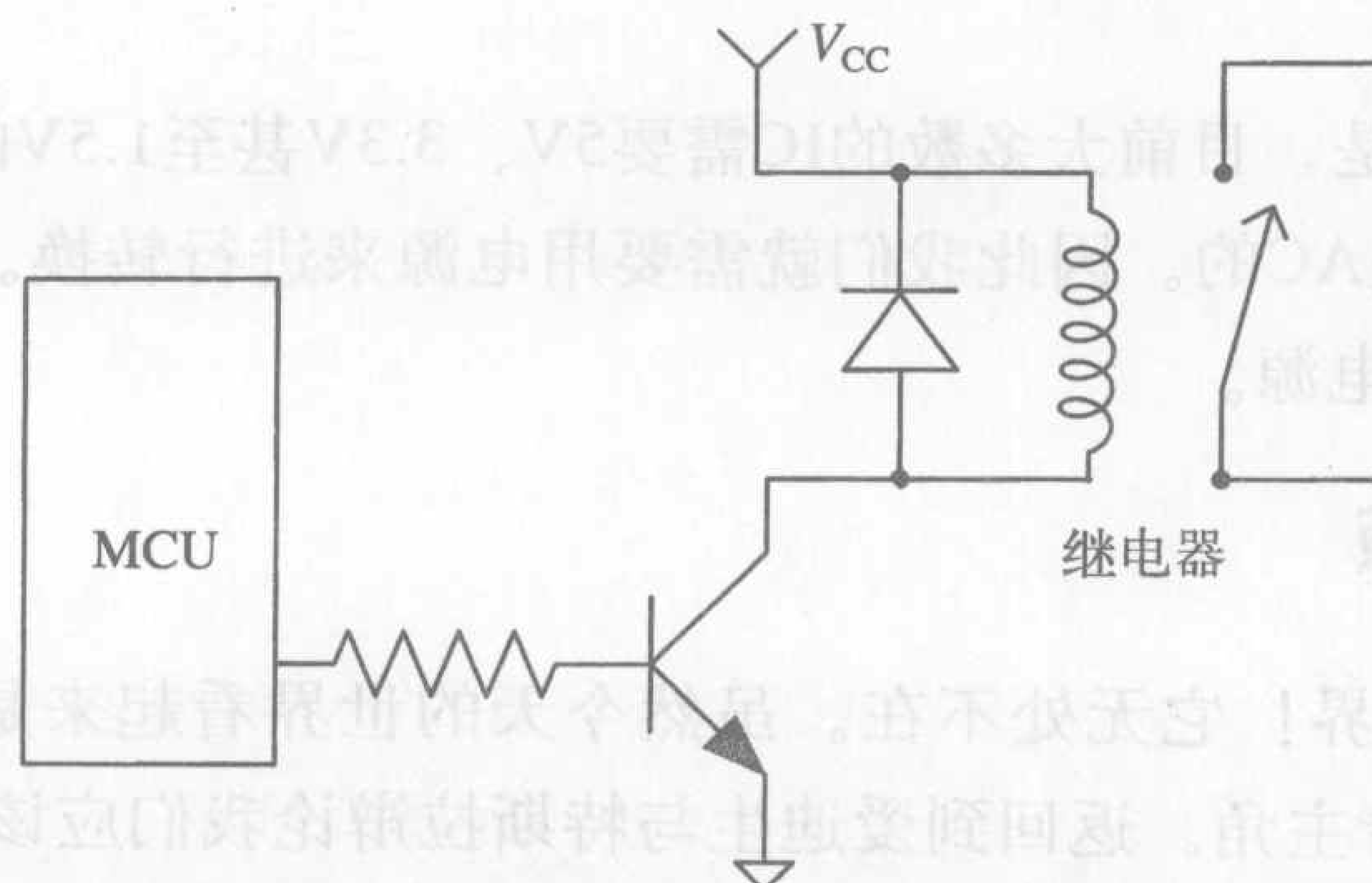


图4-22 继电器线圈上的反激二极管

经验法则

- 当经验法则增多时，把它们分成更容易理解的小块。
- AC感应电机会在转子中感应一个电流，该电流进而产生一个磁场，该磁场进而转动转轴。
- 通用电机的接线既适合于AC，也适合于DC。
- 螺线管在通电以后，其中的铁棒将不愿意离开线圈所构成的"安逸"的管洞。
- 注意继电器的最小开关电流。
- 除非你想做一个电击盒子来惊吓你的伙计，否则请用二极管来"捕蚊子"（catch fly），以免你的电路产生尖峰电压。

4.4 供电

不管你用电子学去干什么，你都需要电源使其运行。理解电源的基础是很重要的，因为在你的职业生涯的某个地方，你肯定会遇到电源相关的问题需要处理。

4.4.1 电压的需求

如今的大多数设备都希望电压恒定，而电流则可以按需要变化。在电源的世界里，尤其是在牵涉到无处不在的IC的时候，你会觉得似乎永远都难以得到你所需要的那个精确电压。

有大量的产品是靠从墙上的电源插座中取120V交流电来运行的。也有大量的产品靠充电电池来运行，其电力也间接来源于墙上的插座。另外还有许多的产品，则靠从超市买来的普通电池来运行。你问一问自己，上次过圣诞节的时候你买了多少电池呢？

但现在的问题是，目前大多数的IC需要5V、3.3V甚至1.5V的DC电压。这既不接近120V，更不是AC的。因此我们就需要用电源来进行转换。电源有两种类型，即线性电源和开关电源。

4.4.2　线性电源

交流统治着世界！它无处不在。虽然今天的世界看起来是依靠电池在运行，其实还是AC在当着主角。返回到爱迪生与特斯拉辩论我们应该使用什么样的输电方式的那个时代，我敢打赌他们根本就不会想到，在接下来的百余年里，在电气的世界里会发生AC与DC的整合。

但是有一样东西他们知道，那就是变压器。变压器的基础是交流电。将交流输入到变压器的一侧，根据变比的不同，你将从另一侧得到另一个电压的交流。因此，把120V的交流输入到一个变比为10：1的变压器，你将得到一个12V的交流输出（由于绕组存在电阻，发热损耗等会引起少许的电压降低）。

基本的变压器的结构十分简单，它就是绕在大捆铁片上的导体线圈。这种结构非常结实。变压器是可以改变交流信号电压的一种近乎理想的方法。在长距离输电中，变压器将电压升高，以使线路损耗最小，到了用户端，变压器又将电压降低到一个安全的水平，以便引入到你的家里。

在千百万的应用中，变压器还会进一步将电压降低，不过输出的仍然是交流信号。而我们的大多数芯片需要的则是直流信号，那么下一步该怎么办呢？

将这个交流信号通过一个整流器，转化为直流信号！通常有两种设计，一种是采用图4-23所示的桥式整流器，另一种是采用图4-24所示的带中点抽头的整流器。请注意后面这个少用了两个二极管，但往变压器多接了一根线，整流的输出却是相同的。

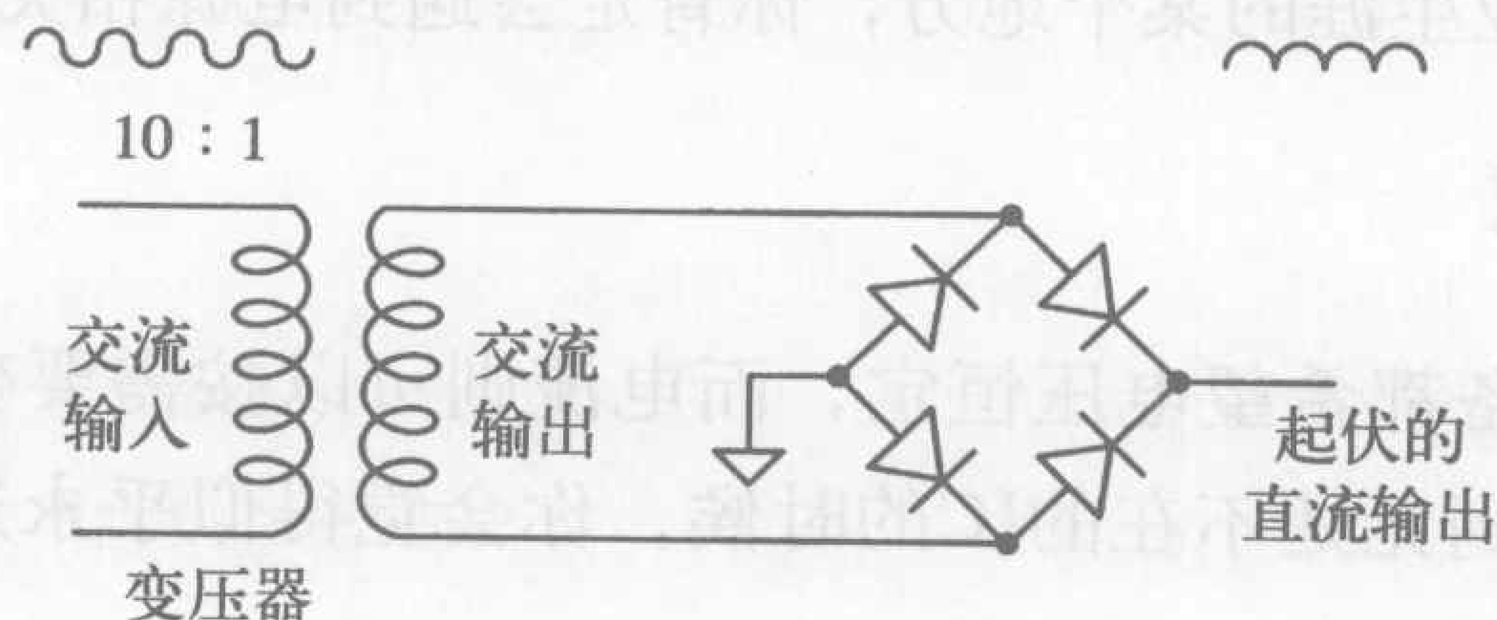


图4-23　桥式整流器

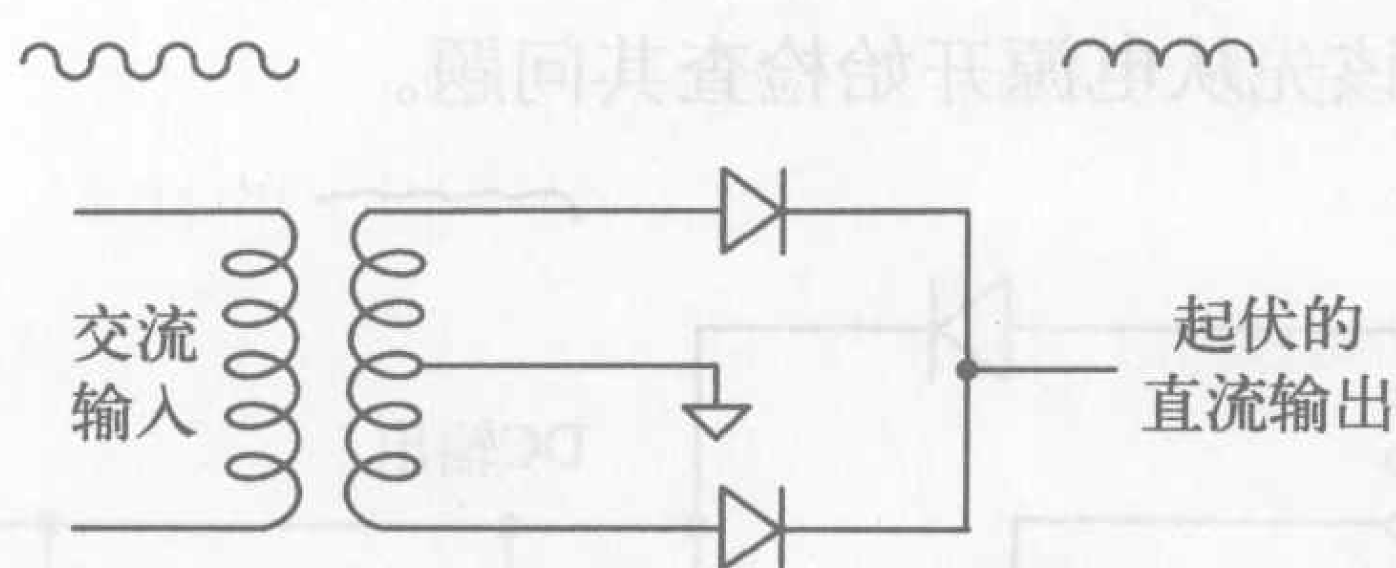


图4-24 带中点抽头的桥式整流器

对于敏感的DC电路来讲，这两个图中输出电压的起伏太大了，没有多大用处。下面我们要添加一个大的滤波电容，以使起伏变得平滑，如图4-25所示。

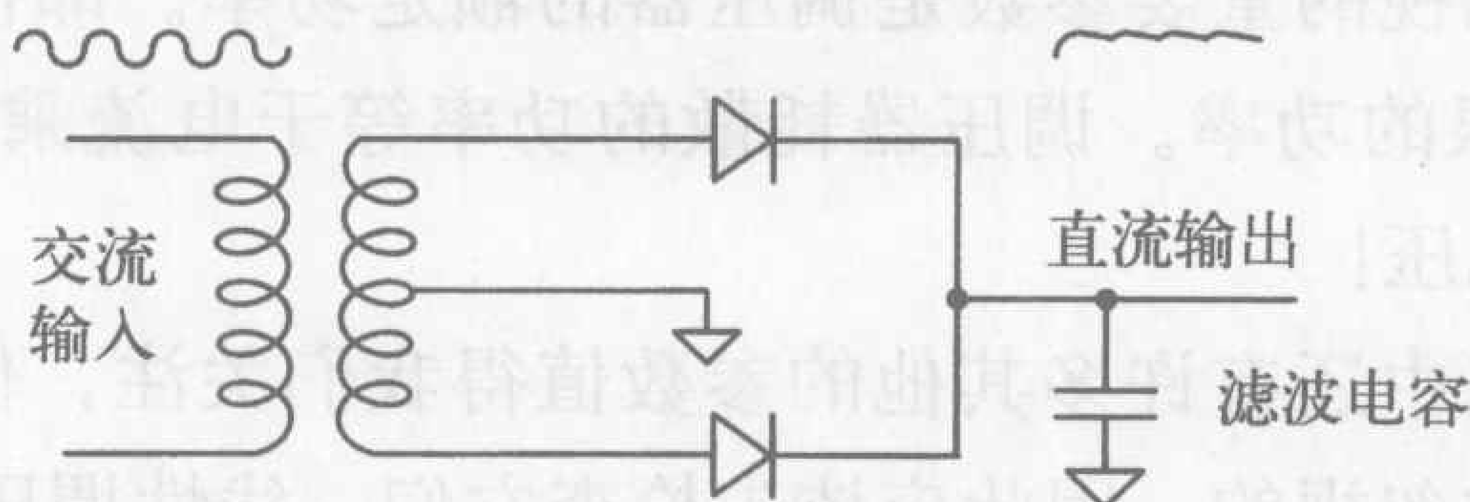


图4-25 带滤波电容的中点抽头桥式整流器

在这里你有必要了解输出阻抗的影响。每个电源都有输出阻抗，电路需要的电流越大，输出阻抗问题就越严重。记住欧姆定律是这样说的，通过一个阻抗的电流增加，阻抗上的压降也就增加。这就意味着随着负载的增加，输出的电压将下降。使问题变得更加复杂的是，由于电路中整流器的存在，当负载增加时，它将导致输出电压中的纹波也增加。因此，这个电路中的输出电压有两个重要的影响因素：一个是输入到电路中的电压（在大多数的交流电路中，其变化可达到10%甚至更多）；另一个则是输出电流，它会增加电压降并引起电压纹波。

在我们将输出电压送往电路的下一个部分（即所谓的调压器）之前，了解以上的知识十分重要。调压器则是调节输出、维持电压恒定，以应对负载变化及输入电压变化的一个部件。

一般来讲，线性调压器在内部有一个电压基准电路（例如一个稳压管），其中的电流较小，且不会受到负载的干扰。调压器利用这个电压基准以及一个负反馈环来控制内部的一个晶体管或其他器件，以维持输出电压的恒定。这样一来，我们就可以得到一个可以满足IC需要的DC电压。从墙上的插座引出的整个电路如图4-26所示。

对于线性调压器，我们需要了解的知识很多。首先，它们的输入电压有个最小限值。如果因为前面提到的某种原因，输入电压降低到了这个最小额定电压之下，那么输出就无法得到有效的调节。这时你的芯片得到的将是一个有纹波的电源。如果纹波不大，你也许不会觉察到影响，但你若在某个高增益电路中发现了

AC噪声，那么你应该先从电源开始检查其问题。

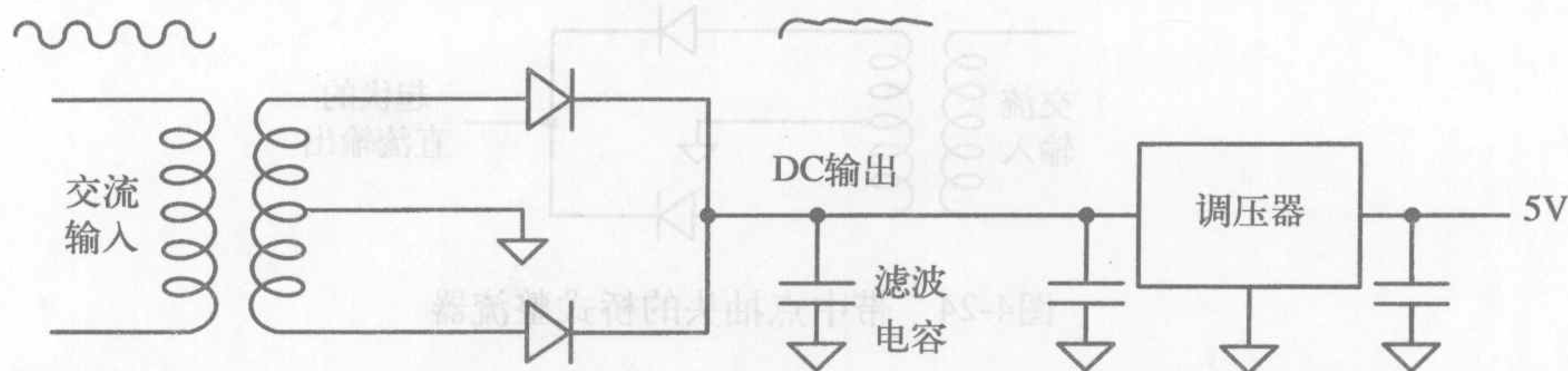


图4-26　典型线性调压电源

另一个常被忽视的重要参数是调压器的额定功率。即使用上了散热器，调压器也只能处理有限的功率。调压器耗散的功率等于电流乘以调压器上的电压降，而不是乘以输出电压！

虽然在参数表中还有许多其他的参数值得我们关注，但以上提到的参数是最重要并且最容易被忽视的，因此应该先检查它们。线性调压器可以用在任何DC输入－DC输出的地方。在大多数的情况下，它们都将工作得很好。当然最主要的还是这种电路十分简单可靠。能用它们就尽量用吧！在某些应用中，线性调压技术并没有什么问题，但如果你需要更高的效率或更小的发热，那就应该考虑使用开关电源。

4.4.3　开关电源

有一类调压器和电源称为开关电源（switcher），它们发展迅速并胜过了其较老的对手线性电源。顾名思义，它通过开通/关断电流（或电压）来调节传输到负载的功率。我们这里将集中介绍开关电流的方法（然而请不要忘记，电流和电压是通过欧姆定律紧密地联系在一起的）。这类电源的秘密在于电感，而对我来讲，理解电感的秘方在于用电流来考虑问题。如同电容试图保持其上的电压不变一样，电感也试图维持其中的电流不变。

1. DC－DC转换

开关电源是DC到DC的转换。即使是那些拥有AC输入、DC母线输出的电路，也得在进行开关电源的处理之前使用整流器。你会看到，开关电源只是取代了前面图4-26中那个电路中的调压器的位置，它也得靠变压器降压、整流后得到的DC母线电压来工作。当然你也可以看到这样的开关电源，它直接从交流线路整流得到电压，一步就把120V的电压降低并调整到5V。

最基本的电流开关型电源是Buck变换器。Buck变换器用于将较高的DC电压降低为较低的DC电压。如图4-27所示的原理图显示出了Buck电路的核心。

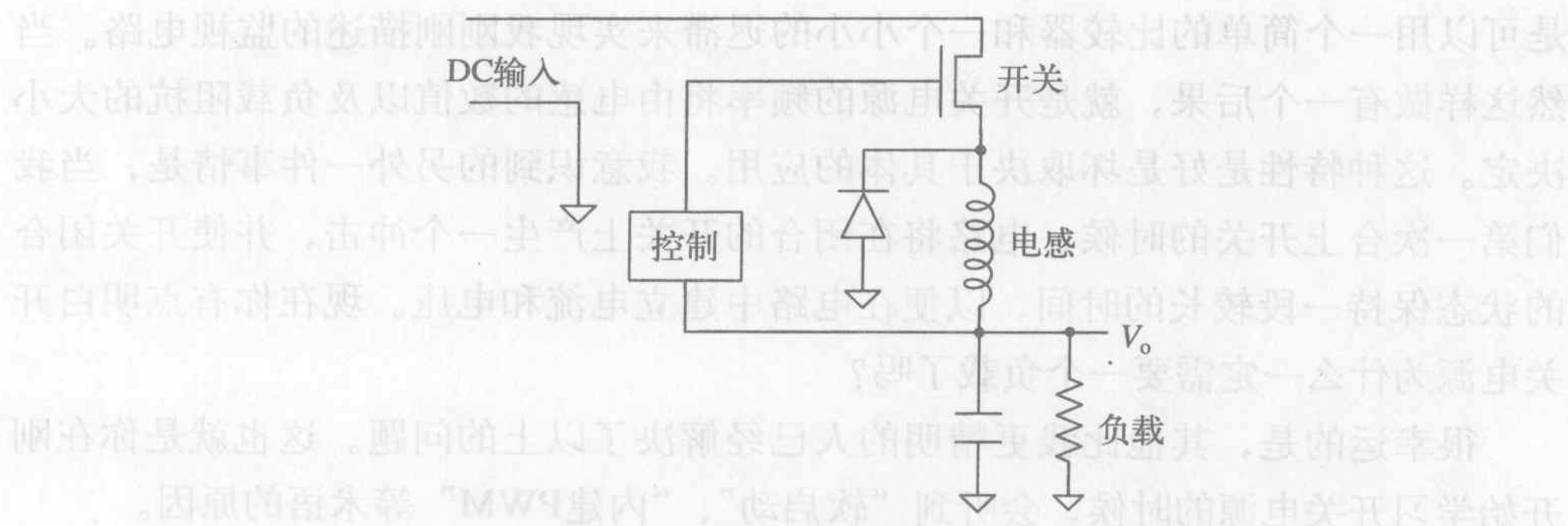


图4-27 基本的开关电源电路——Buck变换器

在图中我们可以看到4个主要的部件：电感、开关、二极管以及负载。

2. 反转开关

让我们从负载开始，往回分析电路。首先，开关电源必须得带上负载，没有负载的话，将出现怪异的事情，这个问题将在后面进行详细的讲解。负载所希望的是一个恒定电压（大多数情况如此）。还记得欧姆定律吧？人们可以通过控制流过电阻（或负载）的电流来控制其两端的电压！因此让我们考虑流过这个电路中的电流。假定开关一开始是闭合的，因此电流将经过电感流入负载。电流将依据电感以及负载的时间常数来上升。由于电流增加，因此负载两端的电压也升高。现在假定我们有一个电路在监视着负载的电压，当发现负载电压太高的时候，它就断开开关。

这样一来会发生什么事情呢？首先请记住这个事实：就像电容阻碍电压的变化一样，电感阻碍电流的变化。当开关断开时，电感试图维持电流继续流通。如果电流无处可去的话，那么在磁场消失的时候，电感的两端将产生一个很大的电压。从理论上讲，在断开的瞬间，这个电压的数值是无穷大。当然在本例中，由于二极管以及负载的存在，不会发生这种事情。

由于二极管的存在，电流会继续往负载流。可以这样来理解这一点——电流想继续从电感中往外流，并从电感的另一端返回。没有这个二极管，电流就没有通路。然而，有了二极管以后，电流就会被推入到负载中。因此，现在开关虽然是断开的，但电流却仍然在往负载流。这个负载电流在开始时的大小跟开关断开瞬间的电流大小是相同的（记住，电感希望维持电流不变），并从这个数值开始衰减。随着电流的下降，负载电压也降低。当然我们仍然有一个电路在监视着负载电压，当它变得太低的时候，它又使开关闭合。然后，这个过程就会一直这样重复地进行下去。

当我第一次明白以上的工作原理的时候，我意识到了两件重要的事情。第一

是可以用一个简单的比较器和一个小小的迟滞来实现我刚刚描述的监视电路。当然这样做有一个后果，就是开关电源的频率将由电感的数值以及负载阻抗的大小决定。这种特性是好是坏取决于具体的应用。我意识到的另外一件事情是，当我们第一次合上开关的时候，电路将在闭合的开关上产生一个冲击，并使开关闭合的状态保持一段较长的时间，以便在电路中建立电流和电压。现在你有点明白开关电源为什么一定需要一个负载了吗？

很幸运的是，其他比我更精明的人已经解决了以上的问题。这也就是你在刚开始学习开关电源的时候，会听到"软启动"、"内建PWM"等术语的原因。

3. 几点最后的考虑

由于设计开关电源、使其稳定工作并处理电感参数等工作是一项既有一定市场需求，又有一定的技术难度且十分繁琐的任务，因此在大量公司都试图让用户选用它们的元器件的各种努力下，出现了各种各样的帮助资源。你可以找到设计指南甚至基于Web的设计平台，来帮助你进行开关电源的设计。我极力推荐大家好好利用它们的优点。

如今你可以很容易地找到将各种控制电路、开关器件以及反馈元件都包含在一起的灵巧的小封装芯片①，那么这将使设计变得更紧凑、小巧。你还可以设计制作出类似于Buck变换器的升压开关电源，以及既可以升压、也可以降压的开关电源。不管哪一种，它们都基于同样的一个事实来工作，即电感总试图维持其中的电流不变。这里不打算对此作更深入的介绍。

开关电源的最大优点在于，你可以使用相对较少的铜，并得到很高的效率（较少的发热）。其原因在于，尽管电感中电流的衰减速度取决于它的尺寸，但如果你开关得更快的话，那么平均电压和平均电流仍可以维持在相同的水平。因此，你可以使用少得多的铜，却可以达到与频率较低时一样的效果，这在大电流、低电压的情况下更是如此。其效率得以提高的原因在于，与采用变压器的等效设计方案相比，开关电源由于使用了小得多的电感，其加热铜所用的功率要小得多。不过获得这些好处也是有代价的。开关电源有大量的高频噪声，会对许多敏感的模拟电路产生干扰。不过话要说回来，现在还有谁关心模拟电路呢？

经验法则

- 要保证调压器输入电压的波谷点不低于调压器容许的最小输入电压。
- 在AC输入变化±15%的情况下，检查你的电源。

---

① 我知道，只有真正沉迷于技术的工程师才会认为一个IC拥有灵巧的封装，不过我从来不否认我也曾沉迷于技术。

- 线性调压器耗散的热（功率）等于电流乘以从输入到输出之间的电压降。
- 开关电源利用了这样一个事实，即当开关断开时，电感将试图继续维持电流。
- 开关电源效率更高、产生的热量更小，但通常更难设计制作。
- 就EMI来讲，线性电源十分安静。
- 就EMI来讲，开关电源有很多的噪声。
- 开关电源要想正常工作，起码应该带上一个最小的负载。

4.5 当元件不理想时

在讨论元件可能发生的各种问题之前，我想先介绍一下等效电路的概念。这个概念十分简单：为了建立等效电路，我们将电路中的各种具体的、特性各异的元件用理想的元件组合来代替。这样做有两个好处。第一点也是显而易见的一点是：这使得我们可以对缺陷的影响进行建模。第二点也是我Darren世界里最重要的一点，就是当我们看到构成实际电路的元件组合在一起，会有助于我们更容易地应用自己对理想元件的基本理解，去领会真实元件的作用。

4.5.1 无处不在的R、L、C

三个基本的电路元件就像海滩上的沙，它们会进入到任何东西的里面。而且它们进入任何东西的程度，要比沙进入到任何东西的程度都高。这是因为在一个基本元件的里面，也包含着其余两个基本元件。由电路方程预测出来的电路工作情况，之所以同实际电路的工作情况存在差别，主要原因就在于这里。参数表之所以十分重要，这也是原因之一（即使对于最基本的器件也是如此）。参数表具体描述了器件的特性，其中就包括了这类原因的误差。例如，在反向偏置的二极管中，就有可能会出现的等效电容等。

大多数的教科书称这些影响为“误差源”，因为是它们引起了理想器件与实际使用的器件之间的差别。尽管在每个器件中还存在着一些其他的误差源（这个我们将在以后讨论），但在某些组合中出现的令人生厌的R、L和C，则更是无处不在。(我们应当针对这些元件，不断地强化基础。这种做法的原因现在是越来越清楚了。因为这样做对于你得到一些“啊哈”是很有帮助的！现在就对你自己说：“我总算明白我为什么必须用心去学习这些基础了！”)

当你寻找误差源的时候，所需遵从的最一般的准则，就是要问自己这样一个问题：“这个误差源足以解释我所看到的效应吗？”让我们以二极管为例。二极管在反向偏置时有一个电容值，通常是在pF数量级的范围。请看图4-28所示的电路。

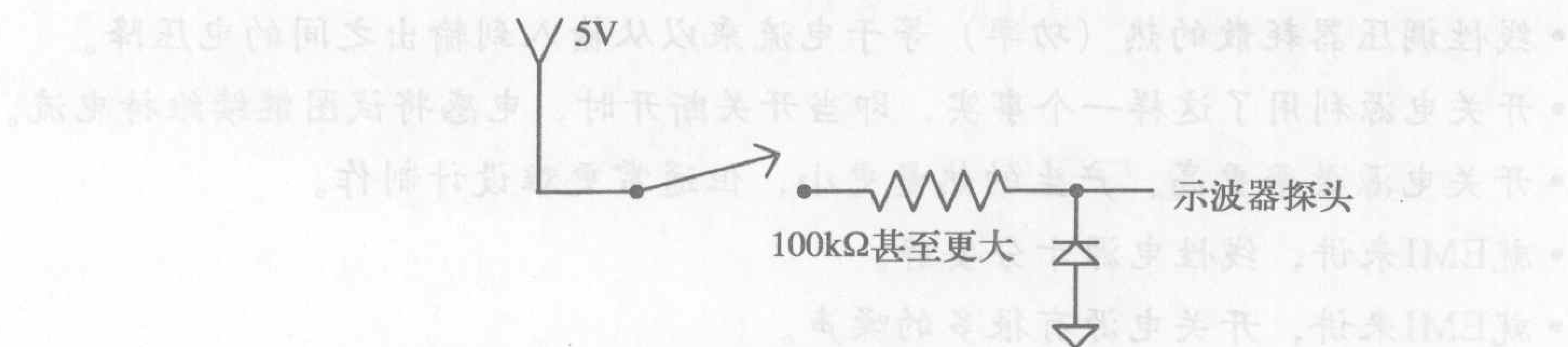


图4-28　需要检查的电路

如果将示波器探头搭在输出上，翻转开关，你将会看到如图4-29所示的波形。

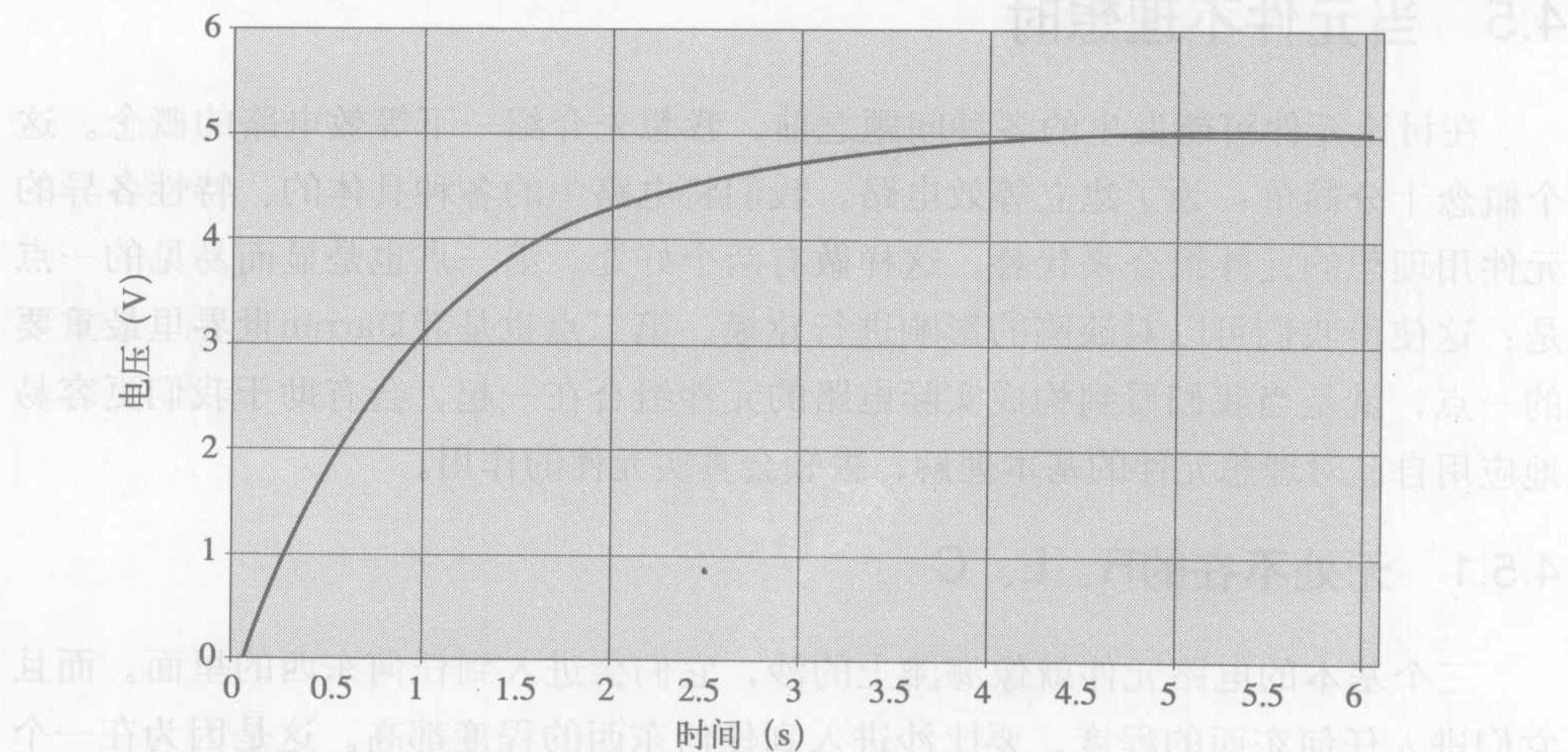


图4-29　示波器上看到的RC曲线

由于在二极管中有电容，因此预期在这种情况下你看到的应该是一个RC曲线。那么图4-29中的RC曲线真是由二极管中的这个电容误差源引起的呢？还是另有原因呢？

现在就轮到参数表发挥作用了。查看你所用的二极管的参数表，你也许会发现这个电容的典型值是100pF。将其代入RC电路的响应时间常数公式里有

$$\tau = RC \tag{4-4}$$

计算所得的结果是10μs。再看一下示波器的曲线，现在你应该将注意力集中在曲线上升到63%所用的时间上，请记住这是在经历了一个时间常数（或τ）的时间之后，该曲线所在的位置。作为一个熟练的示波器操作者，你应该可以使用光标工具，测出信号稍微超过其终了值一半所用的时间，在这个例子中是1s左右。“这不合情理！”你应该对自己说：“如果是二极管引起的，它应该快得多！”

以上讲述的道理主要是为了说明：任何器件中都在一定程度上含有三个基本

元件，但只有了解它们的数值到底有多大，你才可以判断是不是它们引起了你所看到的现象。

4.5.2 误差源：理想与实际

在你设计的任何电路中，都存在着误差源——不理想的问题，譬如传感器有点偏，元件与额定参数有点不符合，或种种其他的问题。

对此你该做什么呢？如果误差源没有给你带来任何问题的话，那么你不需做任何事情。例如，如果你的供电足够大的话，那么一个电容泄漏也许不会引起真正的问题。然而，如果电路是靠电池来运行的，那你手上就有问题要解决了。最重要的是，在你着手解决一个问题之前，先要确定该误差源到底是否构成了一个真正的问题。

一旦你发现某个特定的误差源构成了一个真正的问题，有3个方法可供使用：

①找一个更好的元件

要堵住泄漏电容[①]的漏洞是困难的，这跟堤坝上的洞不同——你不能把手指放入洞中来防止电容泄漏。有时你的唯一选择就是换一个元件。在这种情况下，也许你得用钽电容来替换电解电容。不过有一点需要考虑，就是越好的元件就越贵，因此要合理开销，看情况决定。但这个方法往往是最快解决问题的办法，连设计都无需变化。

②用其他部件来加固问题元件

例如，电解电容的频率响应问题可以通过并联一个没有问题的更高频率的小电容来解决。(你可能已经注意到了，在调压器中，设置电压基准也是基于加固道理，以稳定输出电压。现在你应该知道其原因了吧)。

③在设计中消除误差

这个方法最费劲，其目标是改变设计，以使误差不再成为问题。众所周知的运放就是一个（对普通放大器进行改造设计的）很好的例子。

既然我们已经知道了如何来处理这些问题，那就让我们看看一些常用器件的典型误差源吧。这只是基于我个人经验的一个综述，它并不能替代利用准确而全面的参数表来解决问题的方法。

1. 电阻

我不得不承认，电阻是三个基本元件中最稳定、可预测性最好的器件。碳膜

① 电容中一个十分常见的误差源就是DC电流泄漏。记住理想电容是应该能够阻挡所有DC信号的。我们可以将这种泄漏看成是一个大电阻并联在一个理想电容上。泄漏的电容如此常见，以至于都有自己的专用名称了。如果电流泄漏很显著的话，那么我们就称这个电容为“leaky”，因为泄漏的DC电流就好像是从其中漏掉了一样。

电阻的电感和电容很小。在使用这类电阻时很少会碰到什么问题，除非你处理的是射频和高时钟速度的问题。在大多数情况下，PCB板设计上的不良影响将比电阻自身的不良影响大得多。

这种常用的电阻的最大问题可能要算发热了。超过或接近其额定功率的话，将使其阻值明显超过标称阻值，因此在使用这种电阻时，应尽可能在功率方面多给自己留点裕度。

另一种常用的电阻是陶管电阻，其采用陶瓷管作为绕线基体，内部是一个金属线绕制成的线圈，主要用在高功率应用的场合。在这种电阻里，由于有一个线圈，因此电感效应将比较显著，因为线圈构成了电感。现在低电感的功率电阻的产销已经成行成市，你可以选用这种低电感的功率电阻来绕过这个问题。

2. 电容

在我有限的经历中，我从来没有见过近乎理想的电容。理想电容不应该发热，但实际上每个电容都发热。因此你会自然得出的一个结论就是，在电容中都包含着某种形式的电阻性成分。实际情况就是如此，这个成分叫作ESR，或称等效串联电阻。

根据定义，一个10μF的电容在1kHz下的阻抗应该跟一个0.1μF的电容在100kHz下的阻抗相等。但实际情况并不是这样。这正是你常常在电源电路中看到一个大电容和一个小电容并接在一起的原因。几乎所有的电容都会在其使用的频率范围内发生电容值改变。

大的电解电容往往会像滤网一样泄漏。没有什么特别的好办法来解决这个问题。你要么容忍其存在，要么换用更好的电容。我告诉你，若你想制作小容量的功率电路的话，那么你最终看到的就是电容爆裂、电解液四溅。

我好不容易学到的另外一件事就是，电容只在额定电压的时候才具有额定电容值。在有些时候，给电容加上过高的电压将导致其电容值明显偏离你所期待的数值。

极化电容类似二极管，如果你没有按照其上的标记进行正确的偏置，那么它将不能正常工作。

许多电容的电容值在工作的温度范围内的变化可高达20%，因此不要将它们放在PCB板上靠近功率电阻的地方。

在你为一个具体的应用选择电容时，请先仔细研读电容的参数表。

3. 电感

由于大多数电感是由金属线构成的线圈，因此你可能会想到电阻将是电感的一个最常见的误差源。不错，电阻就是电感的主要误差源。不管你喜欢还是不喜

欢，它都会引起发热和功率损耗。为了减小这个效应，你可以在设计阶段做一件事情，就是使电感中的电流最小化，从而减小电阻的影响。

许多电感是绕在某种铁磁性的铁芯上的。当磁场超过了铁芯所能处理的数值时，就会出现铁芯饱和现象。

在电感线圈的金属线之间会存在一定程度的电容效应，但它们实际上很小，在本书中都予以忽略。如果你要制作GHz的电路，这时电容效应就会变得很重要。此时我建议你去阅读某个比我精明得多的家伙所写的书籍。

4. 半导体

在每一个二极管中，以及在每一个基于二极管的半导体器件中，都存在着电压降。例如，如果你的晶体管放大器没有得到超过0.7V的基极电压偏置，它就不会工作。

轨到轨的运放比起它们的前辈（晶体管）来更为昂贵，这是因为其中利用了专门的电路来消除二极管的这种压降，以使输出和输入都可以达到供电的上下最大电平（上下轨）。

在这类器件的参数表中，你应该仔细查看其输出阻抗和电容效应。在半导体中，电感效应通常较小而不怎么重要。

发热也会在半导体器件中引起误差。它通常会影响内部电阻并有可能导致雪崩击穿[①]。另外还有一件我认为在设计中最容易被忽视的事情，就是半导体元件的发热计算。能够轻松计算电阻所需瓦数的同一个工程师，却往往会忽视半导体中的发热计算。把器件中通过的电流乘以器件上的压降，你就可以知道它会消耗多少功率了。

半导体的世界是如此的广阔、如此的多样，我的这个综述根本就没法做到全面或深入。我只能像破损的唱片或有划痕的CD那样，向你发出一个不中听的请求：“请你去参考参数表吧！”

5. 电压源

有什么因素会导致电压源无法维持其输出电压呢？让我给你一点提示，在带上负载时，电压源的温度会升高。是什么引起它发热的呢？你一定想到了，是电阻！电压源有内阻。电池就是一个很好的例子（如图4-30所示）。

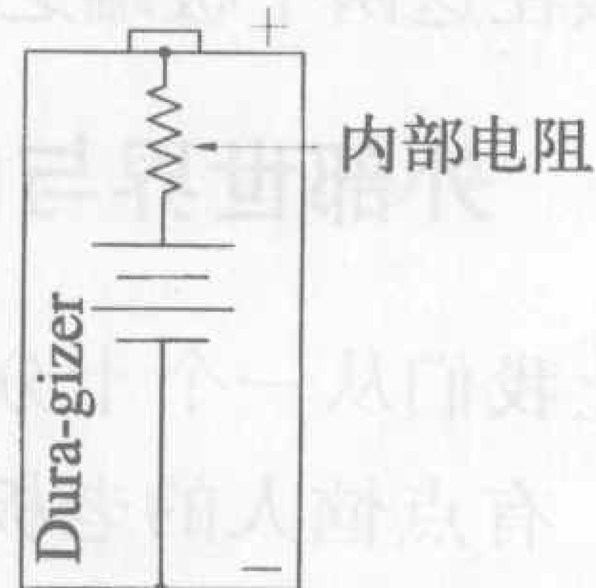


图4-30 Dura-gizer，一种强劲的电池

① 就像雪崩一样，一旦开始往下掉，所有挤在一起的雪块都会碎裂松动一起掉下。雪崩击穿发生时，通常会闻到怪味。

当电流流过负载时，在这个内部电阻上就会出现电压降，其大小符合分压原理。这个内部电阻会跟外部电阻一样地发热，从而使电源温度升高。如果在电源的内部没有对此进行补偿，你就会看到输出电压的降低。

6. 总结

元件都不是理想的，我曾经看到过电机的轴承由于电容效应而过早地磨损，也看到过电容因过热而冲开了极板。真正最需要做的事情就是养成查看参数表的习惯。元器件设计制造工程师们花费了大量的力气来描述器件的不足，并将它们放在了参数表中供你使用。

经验法则

- 总要这样问自己：这个元件的这个误差源足以引起我所看到的这个现象吗？
- 如果一个误差源很小不足以引起问题，那么请忽略它，继续往前。
- 在修正误差时，要么用一个更好的元件来替代，要么多加一个元件来加强，或者从设计的角度将其除掉。
- 电容的电容值随着频率的不同而有变化。
- 电感有内阻。
- 半导体器件有压降和发热问题。
- 电压源有内阻抗。
- 研究参数表永远都不嫌多。

4.6　可靠性设计

大多数工程师的设计都可靠得过了头，他们想给自己留下太多的余地，使用的元件性能往往是技术指标要求的两倍甚至三倍。而经理们则往往会说："请再降低点成本，否则卖不出去！"或"你真的需要那个元件吗？"老实说，正确的答案应该在这两个极端之间。

4.6.1　外部世界与内部世界

让我们从一个十分普通的显得有点陈旧的声明开始（你可能已经从某个头发直竖、有点恼人的老板那里听过这个声明了）："可靠的设计应该将两件事情处理得很好，一个是内部世界的事情，另一个是外部世界的事情。"当你听到这个声明的时候，你前额上也许会迅速出现一种错愕的表情，你会问自己："这句话到底意味着什么呢？"下面就让我用稍微深刻一点的语言来给你解释一下。

内部世界就是构成设计的所有器件。在任何生产工艺中，器件的参数都会出现差异。我们常会被问到的一个问题是：各个器件的参数都在其容差范围内变化时，电路就能够正确地运行吗？如果答案是肯定的，那么设计就是内部可靠的，内部世界就是可行的。然而，千万不要以为只有电子元件才有参数容差。这一点只有从经验教训中才能得到最好的认识。在我以前所做的一个设计中，使用了一个光电传感器来检测皮带的运动。尽管我们正确地认识到了光电传感器存在的参数容差，但当我们进行小批量试生产时，却发现我们所用的皮带的不透明度是变化的。如果光电传感器的参数处于其容差的最高端，而皮带则处于其最透明的状态，那么来自传感器的信号将不够高，因而难以保证逻辑输入电路能够正确地对其进行读取。在大量生产时，这样的问题将以随机故障的形式出现。这种故障被称为容差堆叠（tolerance stack up)。当两个或更多个元件的参数偏差以相加效应的方式组合在一起而引发的故障，就是容差堆叠。这种情况比单个元件的容差问题更难分析。借助仿真器的帮助也许是预见这类故障的最好方法。不过有一点要小心：在你对电路进行容差分析之前，应确保你的电路设计已经正确地运用具有标称参数的理想器件建立了仿真模型（请参考5.2节，以获得更多的建议)。仿真器最伟大的一点在于，它能够在不搭建电路的情况下，在容差范围内改变各元件的参数，以观察相应的影响。就内部世界来讲，你可以调整设计以及元件参数，以增加产品的可靠性。

然而，外部世界则是一个完全不同的野兽。一个良好的设计应该能够处理外部世界扔给它的各种问题。在电子世界里，各种干扰会挫败你的设计。我曾经读到一篇文章，谈的是所谓的生锈锉刀试验（rusty file test)。当工程师完成了电路之后，就将其插在墙上的电源插座上，同时还在其旁边插上另外一个自制的测试装置。该测试装置是一把通过导线连接到插座的地线的锉刀，测试时，将插座的火线引出，工程师将火线在生锈的旧锉刀表面上下反复地擦来擦去，引起火花四溅[①]。如果电路通过了这个测试而没有发生故障，就算其过关。这就是EMI（电磁干扰）试验。电磁干扰本身就是一个完整的课题，因此我专门花了一节的篇幅来介绍它（见6.2节)。如果你放不下这个悬念，可以现在就跳去阅读相关的章节。

不要仅仅把你的注意力集中在外部世界中的电磁干扰，还有其他许多事情会引起问题。例如，振动就可以引起PCB板上的走线断裂、焊点脱落。湿度增大则会使便宜的PCB板膨胀，引起机械变形及连接开裂。它还会与残余的杂屑一起，

① 这是Ron Mancini在EDN上所发表的文章。不过我必须告诉你千万不要在家里做这个试验。有好多比这个更安全的方法可以完成同样的试验。我之所以提及它，是因为它能够对干扰你的电路的这类情况提供一个生动的画面。

在电路中不该短路的地方引起短路。温度对电子元件具有特别严重的影响。你应该仔细了解你的电路需要工作的温度范围，并同参数表中元件的温度参数进行比较。在分析中，不要忘记分析你所使用的器件的运行温度。例如，通常功率器件只要运行就会变得很热。将它们放在70°C的环境温度下的话，将很容易超出它们的最大容许温度指标。

如何才能使自己的设计在外部世界里也是可靠的呢？这里有几件事情可做。

我认为最重要的一件事情就是，要在基础设计中要尽一切可能地使电路能够处理其将面对的环境问题。一般来讲，在PCB板上做少量改动的做法，将比在电路四周可能的地方都加入屏蔽的做法，更能处理好EMI的问题。PCB板上宽大的走线可以抵御机械变形，而少量布置恰当的孔洞则有助于温度的控制。

阅读、阅读、再阅读，反复地阅读你所用元件的参数表，可能要算你所能够做的第二件重要的事情了。你对所用的元件了解越多，你就越能更好地分辨出那些可能会干扰你的设计的误差源。

第三件有帮助的事情，就是要对设计进行测试、检查、测试、再测试。这件事情是最费力气的。你需要重建电路实际工作的环境，观察会发生什么事情。

现在你该明白你的处境了吧！你所面对的是一个由电路内部的元件容差影响以及电路外部的工作环境影响共同交织在一起的局面。这种状况几乎是不可能进行预测的，并且往往只有在实际的运行过程中才会很容易地发现。对此你所能做的只有一件事情，就是要考虑怎样才能防止它，做出相应的改变，并记录下来以备将来在类似的设计中应用。我建议每一个工程师及工程单位都保存一份设计准则的文档，在其中记录下你不断发现的那些经验法则。不要仅仅将它们写下来，还要经常阅读，以保证你所学到的这些经验教训能够在你的每一个新设计中得到应用。这样一个好习惯本身就是一个强大的工具。

几年以前，我接手过一个工程部门。当我刚开始管理这个部门的时候，我们经常被请到生产线的现场去解决这样或那样的怪异问题。我们在解决问题上所花费的时间要比在开发新产品上所用的时间还多。

后来我们开始将精力集中在可靠设计原则上，我所做的第一件事情就是制定设计准则文档。每次当我们发现一条新的设计法则的时候，就将其写下来，并且经常引用它，以使其在每一个新的设计中得到应用。

经过了大约三年的时间，来自产品应用现场的紧急救援请求开始下降。我们花在产品支持上的时间从最初的占总时间的50%降低到了10%。又过了几年以后，我们花在产品支持上的时间降到了不到1%。考虑到我们每天出货的产品有成千上万，因此这应该算是一个很大的成就。有时几个月都没有一次支持的请求，而以

前几乎每天都有。当确有问题出现的时候，你几乎总能够追踪到我们以前写下的准则，因此只需简单照做就行了。这样一来，困难的事情就变成了在每次开始新设计的时候，如何返回去参考以前写下的这些文档。我的建议是不要让这个文档变得太大。文档越大，你愿意读完它的可能性就越小。因此，当它们有变得很大的趋势的时候，请尽力将它们保持在几页的规模。

为了定量描述外部世界的影响，人们制订了很多标准。它们是一些令人打哈欠的文档（我想没有几个人能坚持阅读5min）。但是，关于你的设计将会面临一个什么样的工作环境，这些标准确实能够为你提供一些真正的深入见解。例如，IEEE62.41标准文档就描述了所有EMI相关的问题，而UL991标准文档则描述了怎样才能使控制变得安全。标准的清单正在一天天地变长。对你所做的工作做一点搜索工作，看看是否已经有人制定了这方面的标准。如果你的老板不理解在这方面花时间的必要，那就请他读一下下面的这段话：

老板：当工程师坐在那里阅读时，好像是什么也没有做，然而请相信我，这个努力将在产品的后续阶段为你节省出上百万的钱。因此，请给你的工程师一个成功的机会，你是不会因此而后悔的。

工程师：这并不意味着你将只阅读而永远不设计任何电路。我建议把这种研究的时间与设计的时间之比限制在10%~20%。如果你要做的设计是以前从来没有做过的，那这个比例可能要更高。

如果你正在整夜辗转反侧，试图找出设计中的问题，那么阅读这些标准文档将尤其有用。就我来讲，我把它们放在我的床侧。这样一来，我不仅可以在几分钟里学到更多的知识，还可以睡上一会。它们不仅对设计有帮助，还是治疗失眠的良药！

4.6.2 学会适应

你是否曾遇到过这种情况：你已经把一个产品设计好了，这时却要求你做点改动，你因而十分沮丧，多么希望在开始设计的时候就告知你这个改动。你是否曾说过这样的话："同现在增加这个功能相比，你要是早点告诉我的话，会少花一半的代价。"你是否曾惹得老板说过这样的话（在你已经严格按照他们的要求做了以后）："你为什么不做我要你做的事情呢？"在此，我告诉你们一个秘密：你们那些头发直竖的老板大都不希望你们失败！他们只是希望能够往市场上投放一个杀手产品，以便他们的奖金能够增多。

他们之所以没有早点告诉你，是因为他们知道得不够早。他们试图猜测消费

者需要什么，并将其提供给他们。在他的脑袋里，他并没有说要做这个或要做那个产品。他所说的是要把这个产品做成功。在公司追着市场团团转的过程中，新产品被开发、改变，再改变。我把这种现象称为“经理总是追着市场团团转”(Management Always chasing the Market Around)，并简称为MAMA。(想记住某样东西的话，那可是没有比缩略语更好的了！我相信在未来的某个时候，缩略语将成为主要的通信方法，因为其高效！）好啦，现在由于MAMA的关系，许多工程师因产品定位发生改变而体验着惊慌失措的感觉！

在消费产品的世界里，这种情况注定是要经常发生的。当我刚接手我所工作的工程部的时候，这种特别的挫折感就经常出现。由于我在公司里与大量的设计者一起工作，所以我发现主动预见这种改变并为之做好准备是有可能的。当你对这一点达到了得心应手的程度以后，你就可以容易、快速地预见变化，并且你还可以快速、低成本地开发出大量衍生的产品。

1. 模块化设计

为了预见改变，你需要做的最重要的一件事情就是要使你的设计模块化。在这里，硬件设计者们可以从软件设计者们那里取经。一个好的软件工程师会把程序编写成可以反复利用的代码模块。然而，我经常看到硬件工程师从空白的电路图开始每个新的设计。

为了能使模块化设计对你起作用，你必须评估你要设计的产品。其中是否存在那些在不同的设计中既可以安装又可以去掉的部件？哪些部件对于你的大部分或全部产品是共用的？坐下来，画出大量的方块图并且问自己：“这一块有必要做成容易拿下和加上的方式吗？”如果是的话，那它就是可以单独做成一个PCB板的候选，或者可以被做成PCB板上自成一体的一个部分。例如，在一个立体声产品系列中，你就可以使调谐部分与前置放大等分开。(附带说明一下，这通常也会使设计的可靠性增强)。

这种模块化方法最大的一个优点是，可以由不同的工程师来开发不同的模块，从而加速开发的进程。这也使得你可以升级或改进某一部分设计而无需重做所有的设计。但我认为其真正最好的一点还在于，当老板想改变某个模块上的某个功能时，你可以很容易地进行更改。

不过有一点需要提醒你，对于到底该选择哪些部分进行模块化，你必须小心决定。模块过多将导致你的每个产品都增加一份额外的成本。请确保你所做的模块化处理是合理的。

2. 预见变化

请尽量参与到创造的过程中去，以使自己能够看到产品设计进化进程的各个

阶段。通常，功能的改变将在进化的路上反反复复。要不断这样问自己，这个还可以用在哪里呢？要用在那里的话我该如何改动它呢？

要寻找似乎缺少某个元件的地方。例如，经理要求你做一个PCB板，其上有一排LED灯，如图4-31所示。



图4-31 经理想要的一排LED灯

你回答说：“好，没问题！”然后你就制作拥有一排LED灯的PCB板（如图4-32所示），只是现在没有安装缺口处的那个LED灯。



图4-32 实际做出的一排LED灯

不要犹豫，一定要把你所做的事情告诉你的同事和老板。在应对以后可能遇到的改变方面，他们可以成为你很大的一个后盾。最坏的情况就是时时刻刻都在花大量的工作来重新设计每一样产品。相反，如果在开发产品的过程中，你培养起了有效的模块化能力和预见变化的能力，那么你可以比任何人都更快、更便宜地将产品投放市场。这种预见设计的另一个好处是，当要求你开发一个类似的产品时，你早已经做好了所有的准备。只需简单地增加或减去特定的功能，然后就完成了。最重要的是，MAMA再也不会逼得你发疯了！

3. 过犹不及

以上的哲学也存在用过头的可能。不要试图把设计做得过于通用，以至于影响了产品推向市场，也不要在那些不再怎么有用的功能选项上增加太多的成本。记住，也存在着永远也用不上你加入的那些选项的可能性。因此你必须要像年轻的杰迪骑士（Jedi knight是《星球大战》系列影片中具有特异功能的一个正面角色群体）一样，做出理智的选择！

经验法则

- 阅读参数表。
- 考虑容差。
- 了解环境。
- 测试、检查，再测试。
- 形成自己的经验法则或设计准则。
- 研究你的产品的现有标准或准则。

- MAMA会使人恼火。
- 设计要模块化。
- 要预见改变。
- 过犹不及。

4.7　我所偏爱的一些电路

每个工程师都有自己偏爱的一些电路，我也不例外。你可以找到大量的电路手册，它们会教你如何完成各种各样的新奇功能。它们的数量是如此之多，你也许得花上你所有的时间去收集它们，以至于做不成任何其他事情。我建议你将那些自己了解得好、直觉理解得深的基本电路建成自己喜好的电路集。这种做法只是对本书开头所介绍的“积木”哲学的简单延伸。下面介绍的是我自己喜欢的几个电路，其中有些已经被我用在前面作了例子。这些例子确实不错，其原因就在于它们很有用处。

4.7.1　组合达林顿对管

这是一个很酷的应用（如图4-33所示），它用两个晶体管来实现对信号电平V_{cc}的开/关（用NPN管来开关PNP管）。

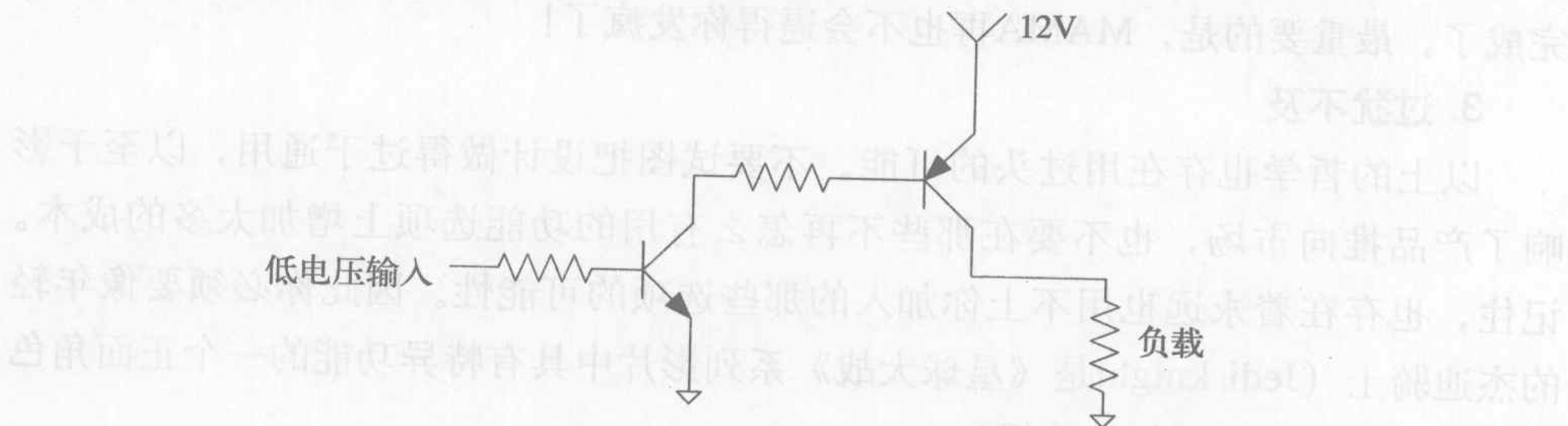


图4-33　NPN管控制接在V_{cc}处的PNP管的开/关

这是可以信手拈来的一个电路，它用一个低电平来控制一个高电平。例如，你有一个微控制器，其输出是5V，而你想驱动12V的负载，这时你就可以用它。你不能更改电路的结构，你只能对V_{cc}腿臂进行开关。在该电路中，你用5V的信号开通一个晶体管，它又去开通另一个晶体管，从而将较高的电压加到负载上。这之所以能够工作，是因为晶体管是电流驱动型器件，当你断开流入PNP管基极的电流时，PNP管就会断开而不管电压是多少。这个电路的另一个好处是，它具有类似达林顿管的优点，但却没有它的缺点。你无需输入很大的电流就可开通输出，

而且跟传统的达林顿对管不同，它在输出上的电压降要小得多，这是因为你没有把两个基－射结串联在输出回路上（只有一个）。如果你还理解不了，请对其做点ISA①分析。

4.7.2 DC电平移位器

如图4-34所示电路其实就是我们已经学过的高通滤波器，只不过此处做了少量改动。在高通滤波器中，电阻是接地的，而现在我们将其接到了一个参考电压上。由于DC的频率为零，因此只有AC成分会通过电容，并被加上一个DC偏置。请确保正确设置电容和电阻的数值，免得信号受到衰减。

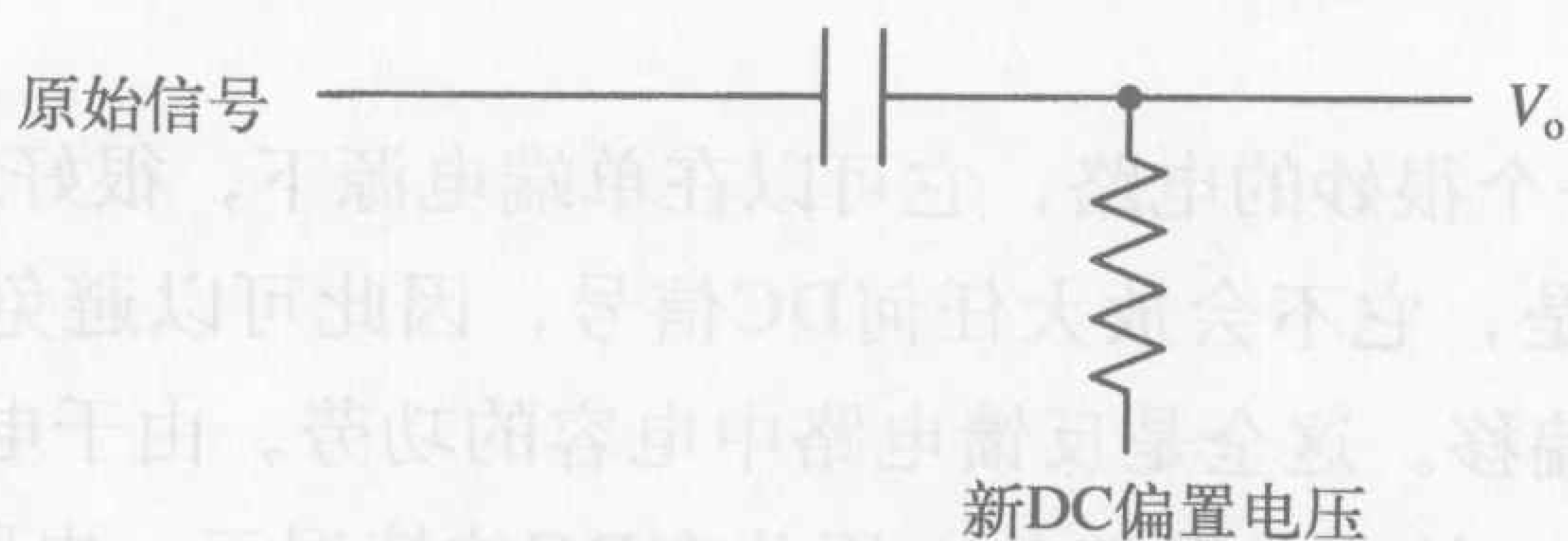


图4-34 改变AC信号的DC偏置

4.7.3 虚拟地

如图4-35所示电路利用分压器来提供一个参考电位，运放则作为电压源（一个电压跟随器），其输出电压与分压器的电压一致。当你在一个仅有单端供电的电路中处理AC信号时，这个电路极其有用。

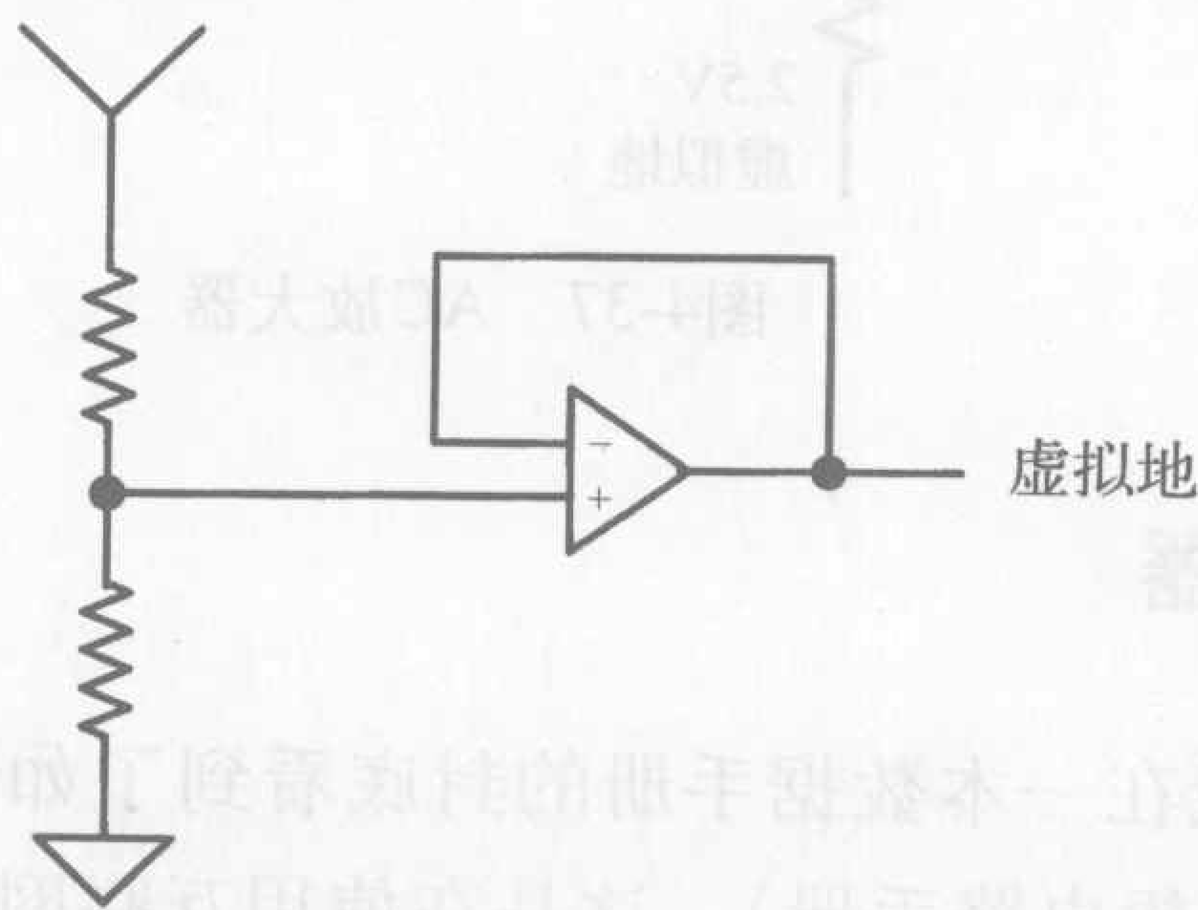


图4-35 在任意电位下建立一个“地”

4.7.4 电压跟随器

当你要测量一个易受负载影响的信号时，这个电路特别有用（如图4-36所示）。

① 直觉信号分析。我一直希望有一天我的故事能够跟一个缩略词联系在一起。

电路中$V_i = V_o$。其最好的一点是，由于运放的缓冲效应，V_i根本没有带任何负载。

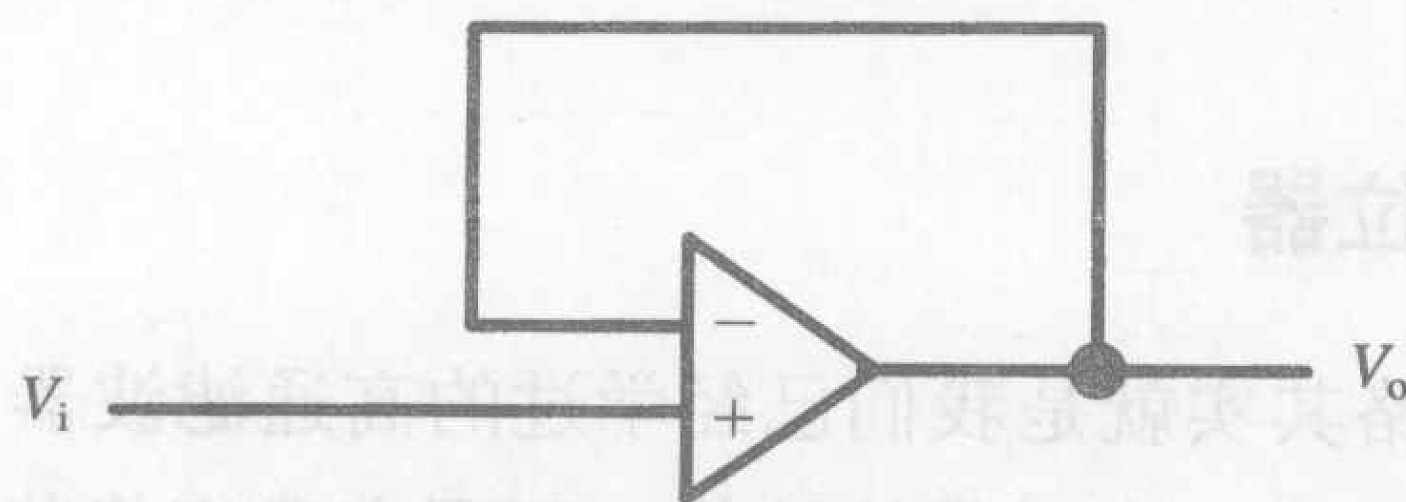


图4-36　电压跟随器

4.7.5　AC放大器

如图4-37所示又一个很妙的电路，它可以在单端电源下，很好地放大AC信号。它的一个很大的好处是，它不会放大任何DC信号，因此可以避免任何DC偏差导致你的信号往上下轨偏移。这全是反馈电路中电容的功劳。由于电容只通过AC电流，对于DC信号来讲，该点是断路的，因此在DC的情况下，电阻到地的连接是断开的状态，运放的行为跟前一个电压跟随器电路相同。

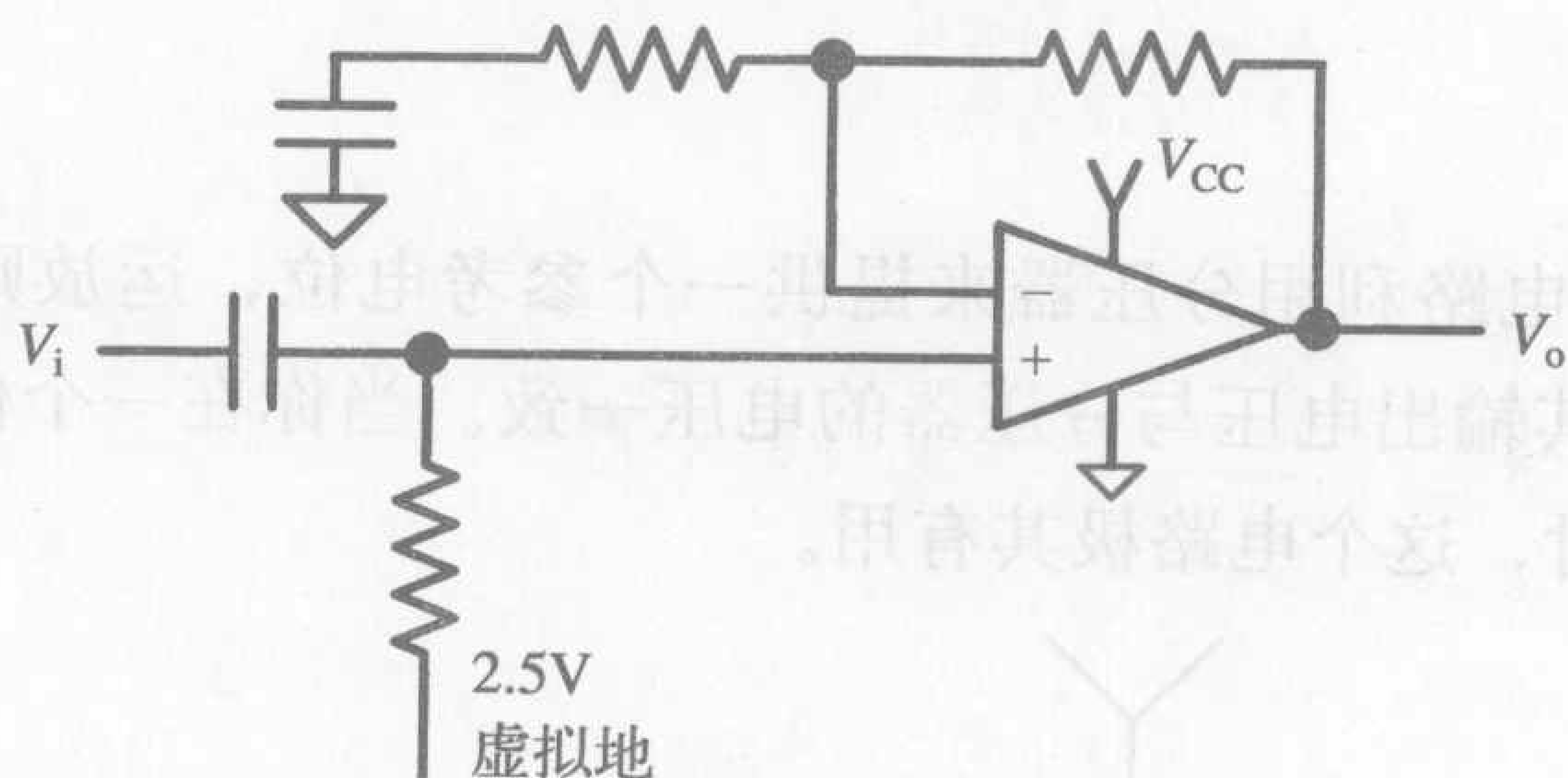


图4-37　AC放大器

4.7.6　反相振荡器

好多年以前，我在一本数据手册的封底看到了如图4-38所示的这个电路（好像是一本Motorola逻辑电路手册）。这是在使用互联网之前的事情了，那时你只有翻书才能找到这个电路。该电路的工作基于这样一个事实：由施密特触发的反相器对输入有一个迟滞效应。因此，在输入电容充电到门槛电压并触发反相器之前，输出将一直保持在高电平或者低电平。在输出翻转之后，一切都将走到另一个方向，这个过程将永远重复下去。在充电和放电路径上增加一些二极管可以影响输出波形的占空比。

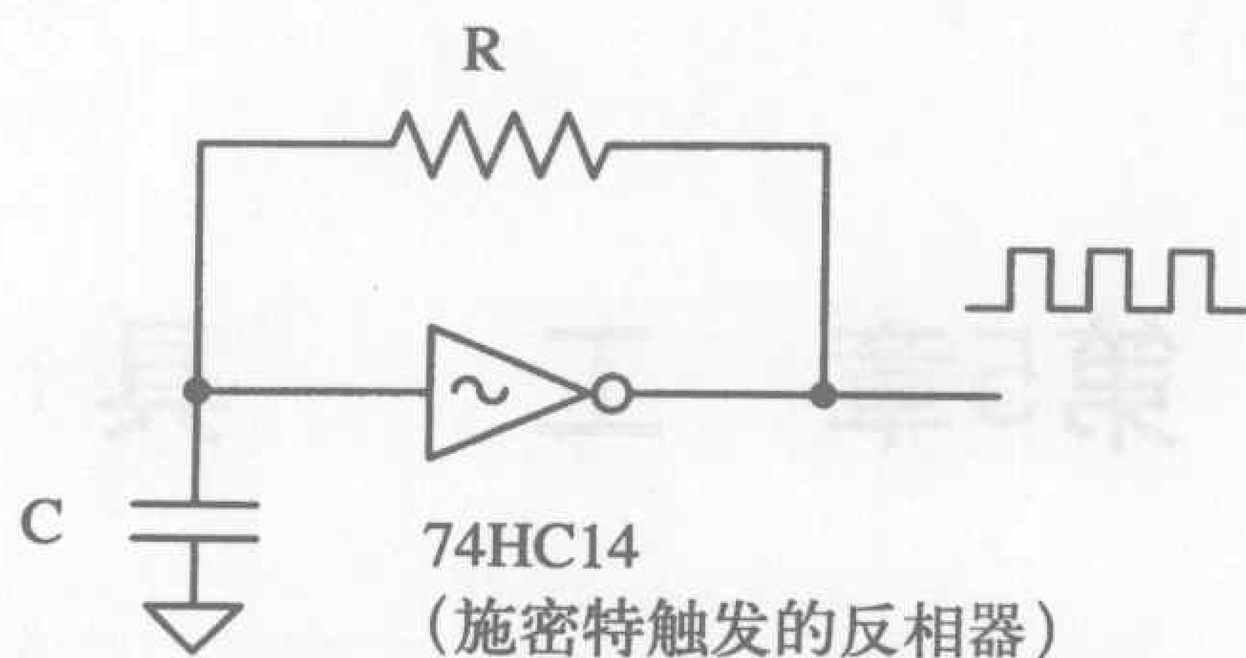


图4-38 施密特触发振荡器

4.7.7 恒流源

通过负反馈（电压跟随）、运放试图维持R_{input}上的电压降不变（如图4-39所示）。即使负载改变，R_{input}上的压降也将保持不变。这是因为，根据欧姆定律，保持R和V不变的话，电流也将不变。请记住，这个电流控制是有运行极限的，它只能在一定范围内改变输出电压，以对负载变动作出补偿。一旦接近极限，电流调整作用就将不复存在。

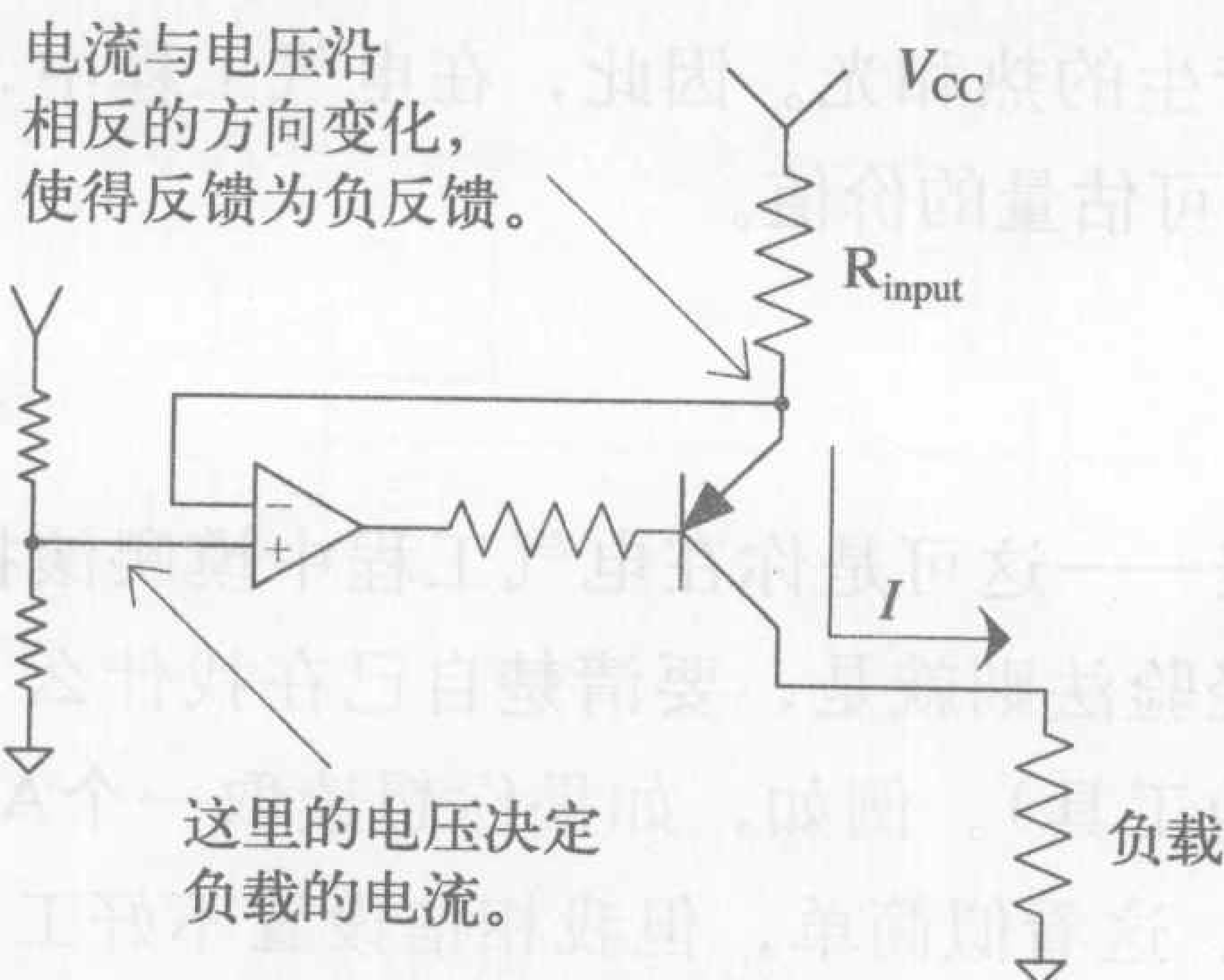


图4-39 电压控制恒流源

4.7.8 积累你自己的电路集

以上只是我喜爱的电路中的几个而已。积累你自己的，并充分了解它们。从里到外充分地掌握几个电路，要比肤浅地知道成千上万的电路更有用处。

经验法则

- 收集自己喜爱的电路。
- 好好地学习它们。

第5章　工　具

该用什么样的工具？什么时候该用它们？这都是普遍性的问题。电气工程师可以使用的工具成千上万，本章不想对各种工具进行全面深入的分析，只想为你提供一个指南，帮助你选择适当的工具并正确配置它们，以获得你所需要的信息。

5.1　让不可见的可见

电气工程中一个普遍的困难是，我们每天与之打交道的电子是抓不住、摸不着也感觉不到的东西。（好啦，我再把前面谈到的关于感觉的那部分内容拿出来重温一下——有一个量，就是电压是你肯定可以感觉得到的！）实际上，我们是基于这些量对物体的影响来推断其存在的。你看不到电流在灯泡中流动，但你看到了流经灯泡的电流产生的热和光。因此，在电气工程中，能够对各种电气属性进行测量的工具具有不可估量的价值。

5.1.1　万用表

不起眼的万用表——这可是你在电气工程中摸爬滚打时用得最多的工具。使用万用表的第一条经验法则就是，要清楚自己在找什么（这条法则通常也适用于你所使用的所有其他工具）。例如，如果你想读取一个AC信号，那么千万不要把万用表设置在DC档。这看似简单，但我相信设置不好工具是很多工程师常犯的错误。从这条法则出发，你还可以推演出一些解决其他误读问题的法则。因此我有了第二条法则和一个例子。法则：不要相信隐含的自动设置。例子：我们曾经想测一个电机的电压，该电压是一个PWM信号，峰值是140V。我们试图用Fluke87万用表来读取电机上的平均电压，但读数不合理（注意法则一的应用）。我们发现，当该万用表处于自动范围模式的时候，万用表的“脑袋”被PWM输入给搞糊涂了。在手动设置其到正确的位置之后，我们得到了精确、稳定的结果。

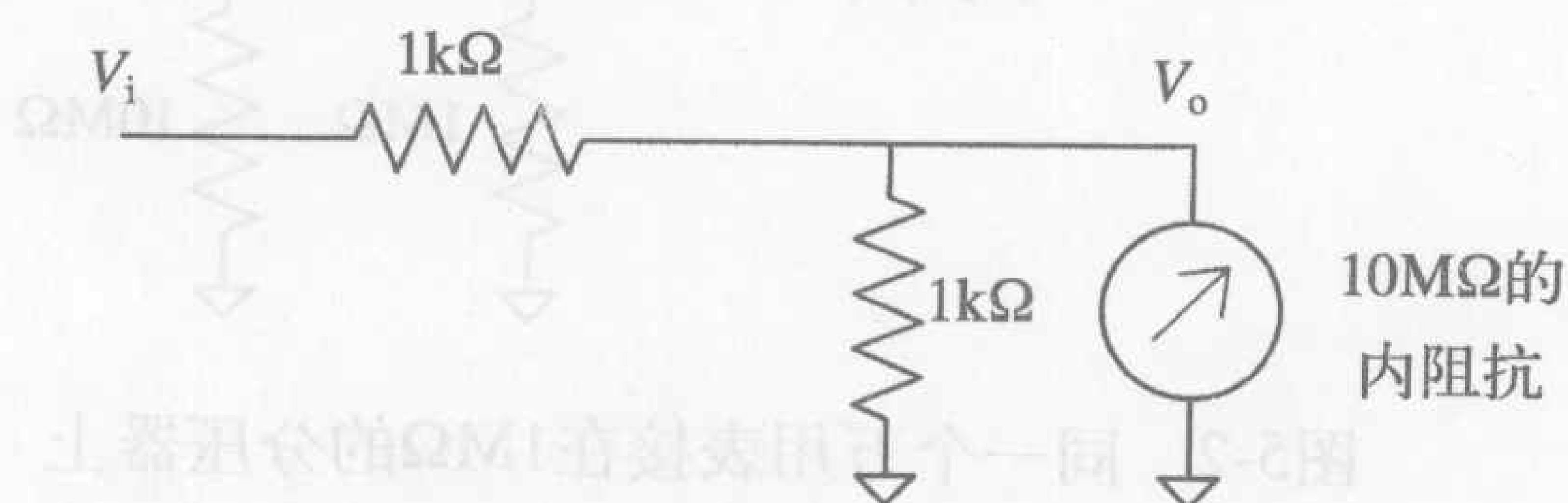
采用万用表测得最多的两个信号是电压和电流。在设置万用表读取电压时，请记住应将探针与要测试的信号并联。在读取电流时，万用表必须串联在电路里。记住电流是一种流动的量。几乎所有的万用表测量电压时和测量电流时使用的是不同的面板插孔。因为在测量电流时，信号要被引入到内部的一个并联电阻，然

后测出上面的电压，并按比例表示成电流。

在万用表中通常有一个熔丝以防止并联电阻过载。在有些万用表中，不同的电流范围采用不同的并联电阻。

无论是在电流模式还是在电压模式，所有的万用表都会对其所接入的电路产生影响。此时你应该问的问题是："这个影响有多大？"典型的数字万用表（DMM）的电压测量回路有1MΩ~10MΩ的输入阻抗。当你将其接到电路上时，你可以认为这是在被测电路的相应位置接了一个电阻。

让我们来看一些例子。假定我们的万用表的输入阻抗是10MΩ，我们要测量一个分压器的电压（如图5-1所示）。



等效电路

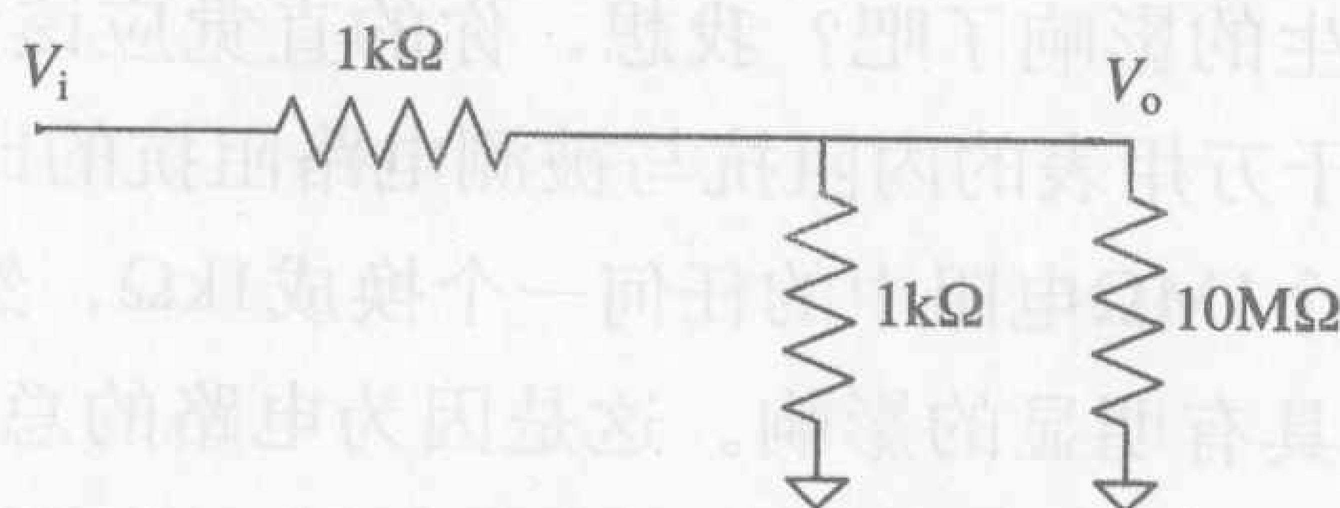


图5-1 万用表接在1kΩ的分压器上时的等效电路

让我们计算一下万用表带来的影响。我们从计算万用表内阻所在的并联支路电阻开始：

哼呀，写呀，划呀，咬铅笔头呀，自己喃喃私语，终于想起了以前学过的法则，"乘法在上、少一个相乘求和在下"，因此并联支路的电阻应该是(1kΩ × 10MΩ)/(1kΩ+1MΩ)，即0.9999kΩ。

现在再应用分压器原理。经过更多的哼呀、写呀、划呀，我们发现没有接万用表时的输出是2.5V，接万用表后的输出是2.4999V。因此，在这个例子中，我们可能都会同意万用表对电路没有什么大的影响。

现在让我们改变电阻值，看有什么发生。我们把电阻改成1MΩ（如图5-2所示）。

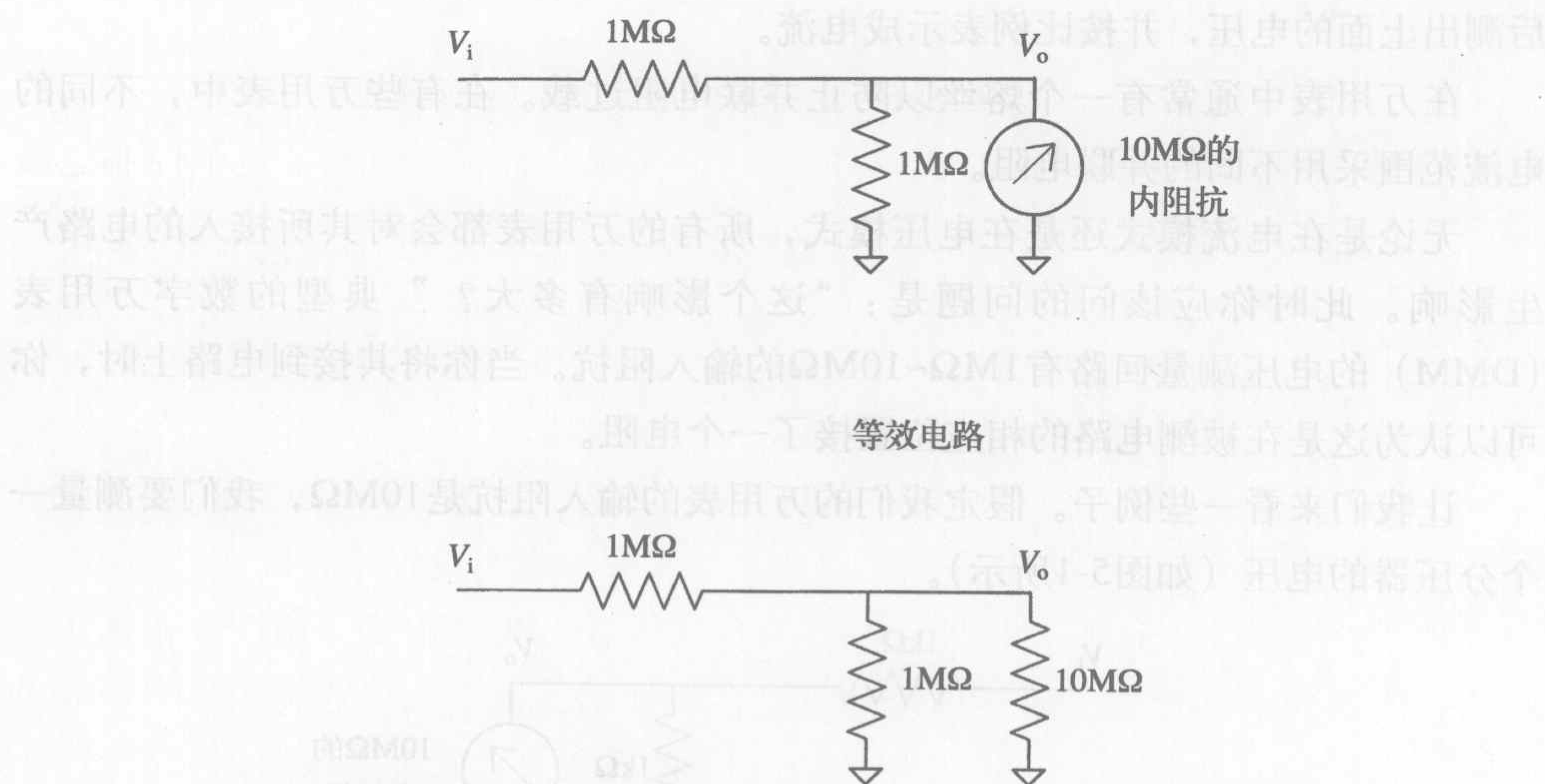


图5-2　同一个万用表接在1MΩ的分压器上

你应该注意到的第一件事情是，没有接万用表时，输出电压跟前面的电路是一样的。但在你接上万用表以后会发生什么呢？1MΩ//10MΩ（这里“//”表示并联）得到的数值是909.09kΩ。将其应用到分压器原理，可以得到输出为2.3809V。现在你看出万用表产生的影响了吧？我想，你的直觉应该已经告诉你，万用表对电路的影响大小取决于万用表的内阻抗与被测电路阻抗的比值。现在来做个试验，请将1MΩ分压器的两个1MΩ电阻中的任何一个换成1kΩ，然后再重复上面的分析，你会发现万用表不再具有明显的影响。这是因为电路的总阻抗大约是1kΩ。这是由戴维南定理得出的结论。如果你有点不明白的话，现在就请翻回到第2章，巩固一下戴维南定理的应用。在确定万用表对电路的影响时，请确保从电路的总阻抗来考虑问题。

5.1.2　示波器

在示波器上有两个主要的控制旋钮，它们的作用有点类似电影《外星界限》（The Outer Limits）中所宣称的：“我们控制着垂直和水平……”[①]

换句话说，在示波器中，你控制着每一格（division）的电压（垂直）和每一格的时间（水平）。这里的“格”是指垂直和水平方向的刻度，它们在示波器的屏

① 如果你用TV Show节目以前所使用的那种面无表情的声音来想象它，就会觉得比较搞笑。对于那些太年轻的工程师，你们可能不知道我在谈什么，我建议你们最好在Google上搜索一下“Outer Limits”。

幕上组成了一个交错的棋盘图案。

接下来的一个重要控制是捕获模式（capture mode）控制，由它来确定你所看到的是DC信号还是AC信号。不幸的是，这个控制通常有点隐蔽。这个控制之所以重要，原因在于它会影响一个信号在屏幕上显示的样子（找一个0~5V的逻辑信号，用示波器的AC模式来看一下，你就会明白我所说的意思）。在AC模式下，输入是经过一个串联电容之后才进入到示波器内部的，这会除掉信号中任何的DC偏置。而在DC模式下，信号对地的电压偏差会得到保持。

我认为示波器是电气工程师所能拥有的最重要的工具。我曾经看到许多工程师由于读不对示波器而走入死胡同。这些事实表明，学习设置示波器十分重要。

首先请注意：永远不要相信示波器的自动设置。我再重复一遍——永远不要相信示波器的自动设置。确保你清楚自己在找什么。由于示波器自动设置引起的问题更为复杂，因此示波器的设置要比万用表的设置更为重要。

例如，假若你想测量一个5V的信号，看看该信号在按下按钮时接到地线的情况。你接上示波器，选择自动设置，然后再按动那个按钮。此时，最可能发生的情景是这样的：示波器看到了一个5V的DC信号，并开始试图寻找某个频率信号来显示，因此它放大信号，直到最后你在屏幕上看到了一个10mV的AC纹波（它其实来自60Hz的电源）。这样一来，你的示波器就自动设置在了垂直10mV每格、水平10ms每格的AC模式。请记住，你本来想看到的是5V的DC信号在你按下某个按钮时连接到地的情况。但自动设置却完全错过了你在找的信号。在这种自动设置下，你甚至都看不到开关的动作，相反，你在屏幕上看到了一个令人糊涂的60Hz的纹波。

这是我所见到的最容易犯的错误。一个工程师将示波器接在一个工作不正常的电路上，选择自动设置，结果示波器上放大出了一个无关的信号，工程师就想："啊哈，我找到问题了！"然后这一天余下的时间就都浪费在追踪某个无关紧要的信号上了。

明白自己到底要找什么，这是在设置示波器中同样重要的一个法则。你自己要清楚这个信号会持续多久，电压的大小会是多少。从这些开始设置你的示波器。一旦你捕获到了你所期望的信号，你就可以放大细节去寻找那些讨厌的杂讯。例如，假定你怀疑上面的例子中存在开关反弹。你设置从5V和500ms每格开始捕获信号。然后，你按下按钮——多试几次，直到你能够可靠地抓到这个信号为止。接下来你就可以开始放大、查找了：先将垂直方向的分辨率放大到2V每格甚至1V每格，然后再沿时间轴进行处理，降低每格的时间长度，并从头到尾一段一段地检查信号。按照这种方式，你就可以让示波器显示你想看的信号。相反，如果你

让示波器去自动设置，那就有点像被绑架的样子，你被蒙着眼睛带着到处乱转。当你拿掉眼罩的时候，你不知道身在何处。你将迷路、弄糊涂、不知道东西南北，这会导致错误的认识。而如果你自己是司机，那就不同了，你知道是如何到达那里的，也知道下面该怎么走。

因此设置是很重要的。下面是另外一些你应该知道的很普通的事情。

要问自己："这个信号真的存在吗？"为什么要问这个呢？因为示波器的阻抗很高，它有可能拾取到一些对你所寻找的信号其实没有任何影响的噪声。试试断开探头，看看这个信号是否仍然在那里。如果还在的话，那这就意味着这个信号是一个辐射噪声，它可能根本就不会影响你所要找的信号。如果你正在处理的是大功率电路和开关电源，那么其中将会出现各种各样的假信号，它们不会影响任何信号，但却很容易被示波器的探头拾取到。

要确保你已经接上了所有的地线探头（尽管在大多数示波器中，它们在内部都是连在一起的）。这样做的原因在于，即使只有一个很小的电流从示波器的地线探头返回，这也会引起不正确的结果。你甚至会以为自己发现了取之不尽的自由能[①]。

在大多数的示波器中，出于安全考虑，地线探头和示波器的接地是连在一起的，这对于观测那些以其他点（接地点以外的点）为参考电位的信号来讲是灾难性的。这会导致电流流过接地的腿臂，其最好的后果是看不到什么显示，最坏的结果是元件炸飞。如果出现这种情况，请使用一个（不接地的）隔离的示波器。

就跟万用表一样，高阻抗电路也会受到示波器接入的影响。你曾经遇到过这样的情况没有，一旦接上示波器，问题就消失了？在相同的位置接一个10MΩ的电阻或一个100pF的电容吧，我敢打赌这样能够解决此类问题（也许你想知道这些数据是从哪里来的，我告诉你吧，这些数据接近示波器探头的内部阻抗）。

如果各种努力都没用，那你就得踏实一点，去阅读一下示波器的手册。是的，我知道这有点苦，但示波器的用户指南（destruction）[②]往往可以在设置方面给你提供一些深入的见解，可以帮助你看到你想看到的信号。

如今的示波器拥有丰富的功能，如很酷的杂讯捕获功能、彩色的显示功能（我个人喜欢彩色的）、放大功能，还有自动设置功能，等等。关键是要把基本的设置搞正确，这样当你使用其他功能时，才有可能明白到底会发生什么事情。记住，除非示波器拥有阅读你的思维的功能，否则的话，能否从示波器中获得你想要的信号关键在你自己。

① 这是可以写一整本书的另一个完整的话题。

② 到底是指导（instruction）还是毁灭（destruction），取决于你怎么看它。

5.1.3 逻辑分析仪

逻辑分析仪跟示波器有相似之处，它也是基于时间来显示信号的。但它跟示波器有两个主要的不同点：首先，它仅显示逻辑电平；其次，它拥有更多的通道。

可以将逻辑分析仪看成是仅能处理数字信号的示波器。它不会给你显示逻辑高和逻辑低之间的信号。也有一些逻辑分析仪内建了几个示波器通道，以绕过这个限制。但是，如果你没有这种类型的逻辑分析仪，那么应该确保自己清楚，你正在从逻辑分析仪上看到的，只不过是一些最接近于你测量的那些信号的逻辑电平。如果逻辑分析仪认定出来的高电平或低电平跟你的实际电路设计的不一样，这将会引起混淆。如果你怀疑逻辑信号没有达到所要求的电压，请用示波器来检查。

逻辑分析仪最好的特征是它拥有如此多的通道。当你想同时观察数据总线上的所有8跟线甚至更多根线的时候，这一点特别有用。如果只有一两个通道的话，那将很难一次观察8个信号。

跟其他仪器一样，如果你不知道自己要寻找什么，那也将很容易出现设置错误。不要盲目地进行设置，而要对你想要寻找的信号的时间基准心中有数。同样也要记住，它是被设计成用来显示逻辑信号的，因此可能会屏蔽掉一些你不希望屏蔽的信号电平。

如今，由于示波器获得了数字储存的能力，它们比以往任何时候都更加接近逻辑分析仪了。而许多分析仪也拥有了类似示波器的一些能力，这使得它们比自己的任何前辈都更像示波器了。如果硬要我做个分类的话，我只能说示波器是一种更为一般的工具，除了不能一次显示大量的通道之外，它几乎可以用在任何地方。而在需要显示大量通道的地方，那逻辑分析仪肯定是必须的工具。

记住，使用这个工具的最基本的经验法则也跟使用其他的工具一样，都是要明白自己在寻找什么。如果你能做到这一点，那么你就会发现这是一个可以任由你驾驭的有效工具。

经验法则

- 永远都要清楚自己在找什么。
- 不要相信自动设置。
- 不要相信自动设置。①
- 这个信号真的有用吗？拿掉探针，看它还在不在。
- 接好所有的地线探针。

---

① 作者为了强调，将相同的活重复一遍。—编者注

- 电路的阻抗越大，就越容易受到测量工具的干扰。
- 阅读用户手册！
- 再强调一次，不要相信自动设置！

5.2 仿真器

首先，我要作一个声明：仿真器是一个很好的工具。但是，电路的主要错误源自仿真器的情况实在是太多了！我常常看到，工程师启动仿真器，仿真他们的想法，然后完成各种设计，最后搭建好实际电路，却发现电路根本不能像仿真的那样工作。其实，仿真器本身就是错误的来源。在工程师全力分析电路为什么不能正常工作的时候，他们想当然地认为仿真器是正确的，这样的情况太过普遍。不知何种原因，在电路经过计算机建模以后，工程师们似乎有一种天性，会对从仿真器中得到的结果坚信不疑。这种情况几乎将无一例外地引起无尽的烦恼和疑惑。你应该把这句格言记在心中："真实的世界不会出错，出错的是你的仿真！"这永远是真的。如果结果不一致，那应该是你的仿真中的某个部分没能正确地扮演好实验室中的样机。仿真只是为真实世界作出的一副画像，而不是真实世界的另外一种表现方式！

5.2.1 理论与实际

这并不是说实验桌上有问题的电路才是你所希望看到的。电路里有一个错误而你的仿真中却没有，这种事情十分平常。你不能因此就否定仿真器未能对你的设计进行正确建模的事实。我发现，如果你总是抱着怀疑的心态去看待仿真，就会发生两点变化。第一，你会对各种元件对电路的影响获得直觉的认识。在你不停地拨弄仿真，努力让其与真实世界一致的时候，你就会开始领会到这个或那个元件的影响到底有多大。第二，你学到了真实世界中各种元件的极限——一些你无法从理论和公式里面学到的知识。例如，让我们来看看以下电路中10μF的那个电解电容（如图5-3所示）。

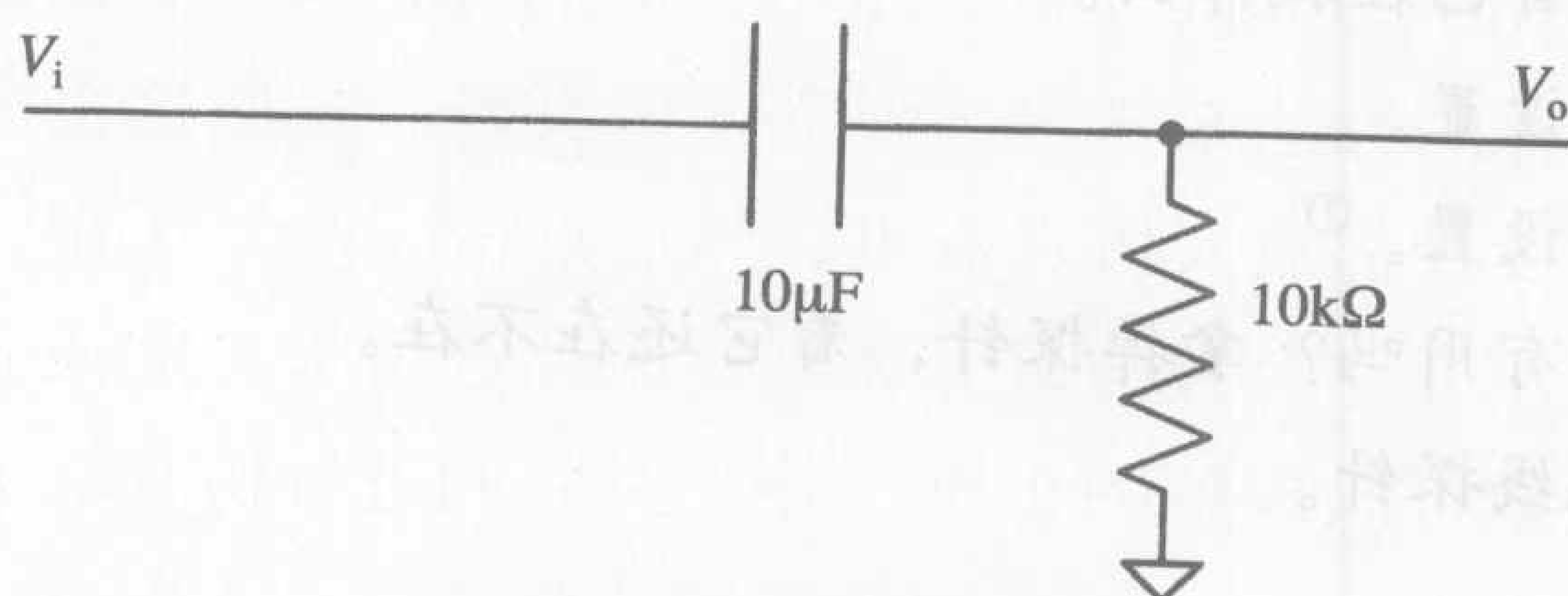


图5-3　RC高通滤波器

根据你所学过的各种公式，这个电路按理应该如你所希望的那样，能通过频率高于$1/RC$的所有高频分量。你能找到的每一个仿真器也会告诉你同样的事情。但是，当你把这个电路接到一个信号发生器上的时候，你就会发现当你把频率调到较高的数值时，电路也不能工作（而理论告诉我们它应该能够工作）。理论没错，错在元件不是理想的。有些仿真器可以使用更加精确的元件模型来创建等效电路。重要的是，你作为一个工程师，不应该忽视充分了解元件极限的必要性。你真的需要知道到底会发生什么，否则的话，仿真只会令你一无所获。在使用仿真器时，估算能力尤其重要。如果你需要提高你的“投手雷”的技术，请翻回到第1章。

5.2.2 功能强大的工具

对于仿真器不能很好地处理非理想器件的问题，我已经说尽了坏话，下面就让我给它说几句好话。毫无疑问，仿真器是你设计出能较好地处理非理想器件的电路的最好工具。

一旦你真正理解了你所用器件会发生的变化，并对此建立了精确的模型，你就可以在仿真器上做一些利用实际器件难以做到的事情。你可以在计算机中搭建千百个设计电路，让每个元件的参数偏离它们的标称值一点点。你也可以点击鼠标，将偏差设置到最大极限，从而无需到处搜罗参数靠近下限的元件来制作实际的电路。如果使用正确的话，仿真器可能是你能拥有的最好工具，它可以让你的设计能够处理元件固有的参数变化。

5.2.3 培养直觉

仿真器可以帮你做到的最好的一件事情就是，你可以利用它来培养你对基本器件的直觉认识。每一个工程师都应该对基本的RC、RL和RLC电路的瞬态响应进行仿真，并改变各个元件的参数值，看看会有什么结果出现。

如果你从简单的电路开始，并在精确建模方面获得了信心，那么你在进行更为复杂的仿真时将更容易成功。这跟学习弹吉他有点类似，你不能光坐在那里拼命地嚎唱自己的即兴小曲“Eddie Van Halen会为你骄傲”[①]，你必须先学会基本的音调。你也应该用同样的方法来学习“弹奏”仿真器。虽然这很容易，但也不要第一次就将你的整个设计都放入仿真器里，然后点击“go”了事。如果你真的那样做了，我几乎可以保证你会被结果弄迷糊，而且这结果可能还是错的。把你的电路拆成简单、凭直觉可以理解的小块，并先对它们进行仿真。大象要一口一口

① Eddive Van Halen是著名吉他歌手，被誉为吉他之神。——译者注

地吃[1]。当你确信你建立的模型已经能够足够精确[2]地表示你的电路的时候，再把这些小块编织到一起，看看会有什么事情发生。

一点警告："弹奏"仿真器是一件很费时间的事情。不要在仿真方面太过投入，以致永远也不去搭建实际的电路。实际上，如果你对电路实际会怎样运行心中没数的话，到实验室搭建电路并看看结果将是最好的办法。在进行容差分析的仿真之前，你应该已经在实验室中搭建好了实际的电路，并已投入了运行。在你开始研究元件变化会带来何种影响之前，应该先让电路能够在标称参数下运行。并且仿真应该跟实验并肩进行。

经验法则

- 真实世界不会错，错的是你的仿真。
- 精确建模，增强信心。
- 用估算来对你的仿真进行双重检验。
- 对基本电路进行建模，以便对基本元件培养起直觉的理解。
- 将模型拆分成容易检查精度的简单小块，然后再组合在一起。
- 仿真与实验应该并肩进行。
- 在设置工具时，要明白自己想找什么、信号有多快、电压有多高等等。

5.3　电烙铁

有一天我经过实验室，看到一个技师正从背后俯视着一个工程师，后者正在做着一件没什么可奇怪的事情——把元件焊在PCB板上。技师只发表了一句评论，他说："我们这里现在有一个工程师正在试图做技工的工作。"然后他坐了下来，很出色地焊好了板子。

我认为一个人越多地了解自己设计的产品是如何被生产出来的，他就越能做出高水平的设计。考虑到这个事实，又考虑到你有可能没有熟练的技工可供差使，因此我将介绍一下焊接的基本知识。

5.3.1　4个基本条件

做出好焊点需要4个基本条件，就是清洁、焊丝、助焊剂和温度。

首先元件必须清洁、干燥。对于已受到侵蚀的焊盘（pad），通常用一点外用

---

① 请参见第1章关于大象的故事。

② 注意精度是相对的。如果你不需要将答案精确到小数点后第4位，就不要浪费时间试图获得这种精度。

酒精就可以使它们变清洁。

第二，需要有焊丝。焊丝是铅和锡的合金，根据比例的不同，其熔点大约在100~200°C之间。在使用得当的情况下，它将在元件和PCB板之间形成电气和机械的连接。尽管它是一种机械连接，但请记住这个机械连接并不特别牢靠。

第三，需要有助焊剂（flux）。在手工焊接时，助焊剂往往就在中空的焊丝里面。什么是助焊剂呢？助焊剂是一种化学物质，当你加热它的时候，它可以起到清洁作用的化学物质，以使焊接处准备好，使焊丝容易粘结上去。在有些情况下，会在焊接之前先用助焊剂，例如在进行波峰焊之前或者在使用焊锡槽的情况下。助焊剂也称松香。

最后，需要加热。热量会使各样东西连到一起。焊丝将流到热的地方。这意味着你要加热元件的引脚，以保证焊丝流动。在做样机时，加热元件的常用方法是使用电烙铁（soldering iron)。其他的方法还有热风笔（hot air pencil)、回流焊炉（reflow oven)，但原理是一样的，即热量使焊丝粘结在焊盘以及元件的引脚上。当你了解了上面的内容并练习几次之后，就知道一个好的焊点应该是下面的样子（如图5-4所示)。

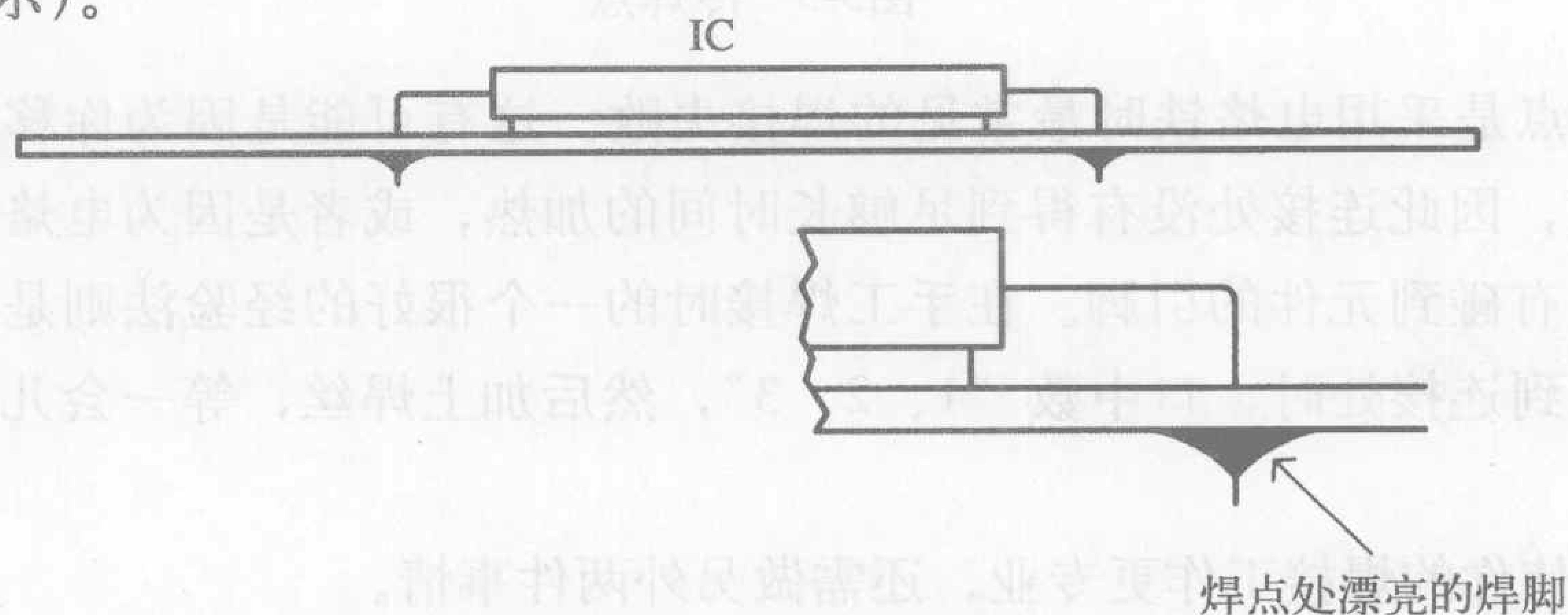


图5-4 好的焊点

5.3.2 焊丝

在上述的4个基本条件中，常常引起问题的是热量的运用，使用电烙铁的情况下尤其如此。元件和PCB板都是对温度敏感的。过热会损坏元件，而PCB板上的焊盘则是用胶粘在PCB板上的，这些胶的熔点比焊丝还要低。[①]过热作用过长的时间容易出问题，元件会被损坏，焊盘和走线则会翘起（当胶熔化时)。

相反的情况则是，如果热量不够，则会导致焊接失败。其中有一种情况被称作冷焊点。当被焊接的两个部件中有一个没有得到充分加热的时候，就会出现冷

① 事实上是故意设计成这样的。因为在焊接过程中，由于加热的原因，铜质走线与PCB基板的膨胀率不同。如果胶能够先熔化，就可以防止这些走线变形。

焊点。这时，焊丝粘结在一个部件上，但另一个却没有。其中没有得到充分加热的那个部件将连接不良。这也是冷焊点名称的由来。冷焊点的样子如下（如图5-5所示）。

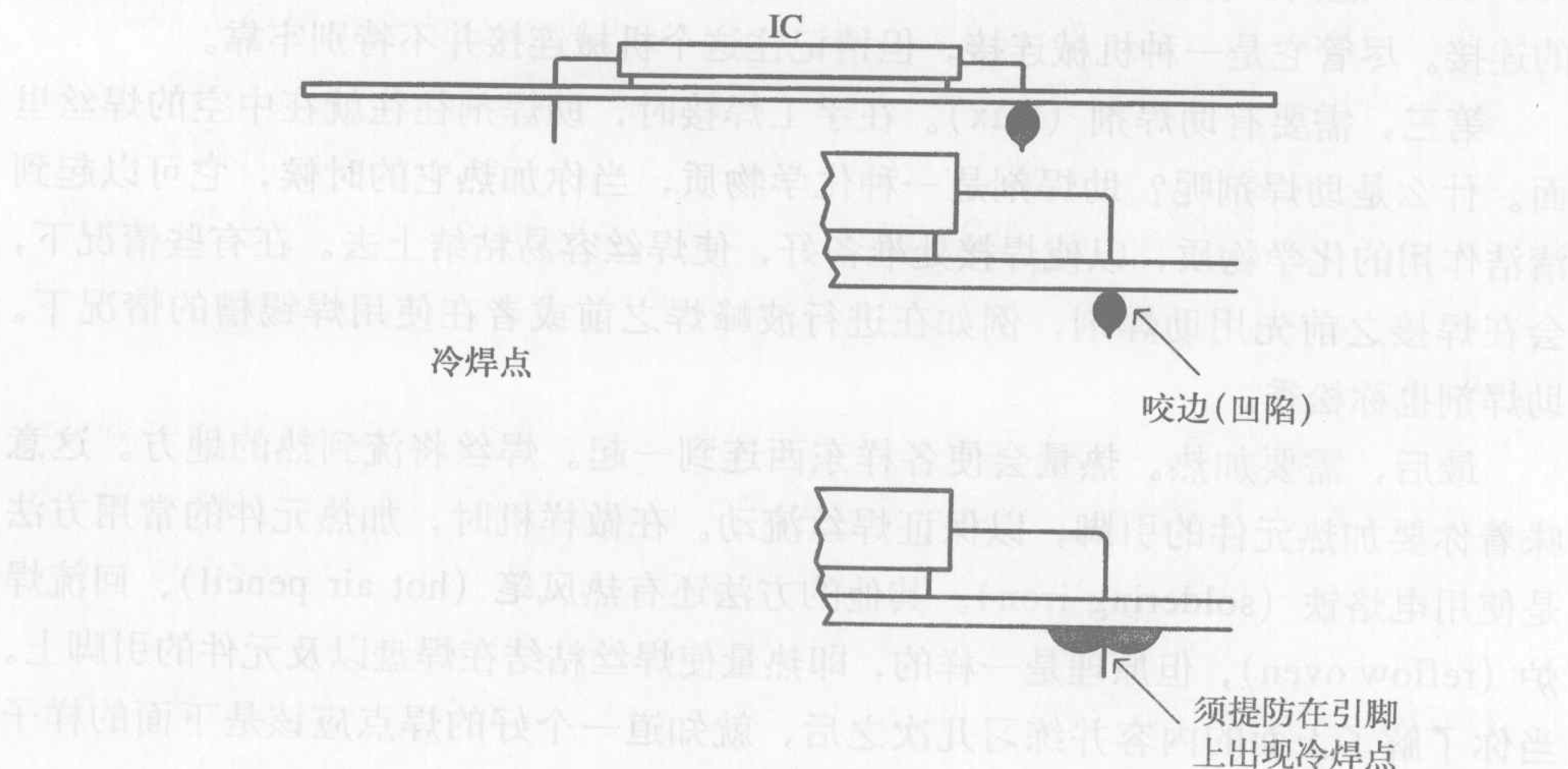


图5-5 冷焊点

冷焊点是采用电烙铁时最常见的焊接失败。这有可能是因为你移走电烙铁太快了一点，因此连接处没有得到足够长时间的加热，或者是因为电烙铁只碰到了焊盘而没有碰到元件的引脚。在手工焊接时的一个很好的经验法则是，当电烙铁的尖端落到连接处时，口中数“1、2、3”，然后加上焊丝，等一会儿再拿走电烙铁。

为了使你的焊接工作更专业，还需做另外两件事情。

第一是要确保烙铁的尖端是上了锡的。如果烙铁已经加热了一会，那么其尖端的焊锡和松香将会挥发掉，尖端会变干。变干的尖端不如有焊锡在上面时那么容易把热量传到元件上。因此，在使用之前，先要在烙铁的尖端上加一点焊锡，这称为上锡（你也可以给导线上锡，以使其容易被焊上）。如果一个元件不容易加热，也可以加点焊锡来帮助传热。

第二是必须经常清理电烙铁的尖端。任何像样的电烙铁都配有一个装水的托盘，里面放有一片高温海绵。将烙铁尖端在海绵上擦一擦可以使其得到有效的清洁。清洁烙铁尖端可以防止堆积起来的助焊剂的残留物干扰焊接过程。一点警告：不要让高温海绵吸太多的水，也不要让烙铁尖端在高温海绵上摩擦太久。太多的水或摩擦太久会使尖端变冷太快，影响下一个焊点的焊接。在焊接下一个焊点前，不要忘记给尖端上锡。

5.3.3 拆焊

除非你从不犯错误，否则的话，在你的职业生涯中总会有某个时候，你得从焊好的PCB板上把某个元件取下来。拆焊（de-soldering）是一种很令人恼火的经历。在拆焊的过程中，最容易使焊盘从PCB板上翘起，烧伤手指，甚至你还会口无遮拦地骂几句脏话。我愿把我的经验分享给你，在你需要拆焊的时候，但愿它们能使你不再破口大骂。另外我还要介绍三个主要的除锡工具：吸锡带、吸锡器和拆焊台。

提示#1

如果可行，牺牲元件。如果你没有必要回收拆下来的元件，那么将引脚剪断会有很大帮助（这样你就不必试着将有40个引脚的元件整块地一次拆下）。剪断所有引脚后，一次拆一个。不过有一次我们碰到了另一种情况，我们要保留那个40个引脚的元件，而不是PCB板。你猜我们怎么做的？拿着板子来到车间，用焊枪对着PCB板的背面一阵猛吹，同时用一个镊子从PCB板的另一面把元件拔了下来。这就像施魔法一样地快，而“烧坏的PCB板”在后来则变成了对管理人员的一个玩笑称呼。

提示#2

往元件上加焊锡。加入焊锡可以有助于把热量传递到要拆除的焊点。拆下元件的窍门在于让所有需要加热的地方尽可能快地加热。例如，你需要拆下一个具有径向引线的电解电容。由于这个元件的两个引脚是紧靠在一起的，实际上可以用焊锡把两个引脚短接起来，从而可以同时加热很快拔出。

提示#3

先拆下元件和引脚，再除焊锡。先加热，然后拔出元件，最后再把焊锡从过孔中弄走。通常，如果你想在拔元件前把焊锡全部除掉，你往往会发现有一小块焊锡把引脚粘在过孔的一边。麻烦的是那是很小的一块焊锡，难以将它加热起来使引脚松开。这时可以用提示#2来再试一次。

吸锡带

吸锡带是铜丝编织而成的。铜作为一种极好的导热材料，在加热的时候会将焊锡吸走。重要的是，必须对吸锡带进行加热，然后将其紧压在焊锡上。如果你只是将吸锡带粘在熔化的焊锡上而不继续加热，焊锡将停在原地不动。记住，焊锡流往加热的地方。

还要注意，吸锡带是铜做成的，铜是会生锈的。一旦生锈，焊锡将很难被吸锡带吸走，因此旧的吸锡带几乎没什么用处。新的吸锡带则很有效，并且便宜而

方便。

吸锡器

吸锡器是我喜欢用的工具，它易于使用、相对便宜且又易于维护。在使用吸锡器时，你按下活塞柱，加热你要除掉的焊锡，然后按动开关，嗖的一声，焊锡就像煮糊的面条一样被吸了进去。要确保其烙铁加热的时间足够长，已经将过孔的焊锡熔化透。你可能还得应用提示#2来将所有焊锡弄走。吸锡器的最大缺点在于，当你需要进行大量的除焊时，你的拇指将变得酸痛。

拆焊台

如果你需要做大量的拆焊作业并且还有点钱，那这就是你要的工具。拆焊台是吸锡器的电动版本。烙铁被集成在真空吸锡嘴的尖端。一般来讲，你需要对其进行定期维护。由于除去的焊锡具有腐蚀性，因此尖端会受损耗。如果使用不当，它将很容易堵塞。请始终倾斜着吸，不要垂直吸。熔化的焊锡有重量并且是活动的，因此斜向一边吸要比垂直吸容易。在焊点熔化透以后，要在几秒钟之内连续吸，以保证熔化的焊锡能够全部进入到吸枪的接收器中而不会凝固在吸嘴的中间。

要想保护好PCB板和元件，这是最快、最容易把焊锡从PCB板上除去的工具。它甚至可以做到引脚还在原地而元件却可自由拿下的地步。要做到这一点，你应该这样做：当吸焊锡的时候，要同时给元件施加一点点很小的圆周运动，以使引脚与过孔脱离接触。不过，如果可以的话，还是牺牲元件的方法来得容易。

经验法则

- 焊锡往热的地方跑。
- 如果这次焊锡没去你要的地方，记住下次它还将往热的地方跑。
- 要想防止冷焊点，请在加热的同时数1s的数。
- 使用电烙铁之前，先给它上锡。
- 经常清理烙铁头。
- 在拆焊时，如果可行，就牺牲元件。
- 加点焊锡，帮助传热。
- 先除去元件和引脚，然后再考虑把焊锡从过孔中除掉。
- 使用拆焊台时，一点点圆周运动可以帮助把焊锡从引脚和过孔清除。

5.4　“人际”工具

在我刚开始自己的职业生涯的时候，有一个经历令我至今仍记忆犹新。接线

员叫我过去接个电话，她说："某某想要见你，他想知道你能否跟他共进午餐。"当时我就想："哦，免费吃饭。但这个似乎跟我有一面之交的朋友，到底是谁呢？"我是在吃墨西哥芝士烤玉米片及意大利鸡饭的过程中，第一次接触到了销售代表、分销商及现场应用工程师（FAE）的世界。

午餐吃得很好。我毫不费力地从菜单上点了自己爱吃的美味，但是请我吃饭的那三个人自己却只点了几个玉米面豆卷，这让我颇费思量。对于他们是谁、是干什么的，以及他们的那种吃相对于当时当地普通的"呆伯特"（Dilbert，指职场人员）来讲到底意味着什么，我当时有点迷惑不解。在这里，我来给大家讲讲这些人到底是干什么的，他们到底能帮你什么忙，这对你也许有用处。

其实，这些人都跟你要用的产品——IC、晶体管、微控制器或其他什么器件的制造厂家有着某种关系。注意这里的"厂家"是指出售器件的公司，而不是你所工作的公司。

5.4.1 生产厂家

销售你感兴趣的那些小器件的公司，一般雇用了好几个层次的人员，以将它们的产品放到你的面前、卖给你。它们也有内部的销售人员和经理，如果你的工作跟他们靠得比较近，那你也许有机会认识他们。你的工作能够跟他们靠得有多近，这通常取决于你所购买的器件在他们的业务量或潜在业务量中占有多大的比重。

如果你能够认识里面的某个人，这永远都不会是坏事。这些人将比以往任何时候都更加乐意为你服务，如果你想知道某个器件在某种恶劣环境下的表现如何，跟实际设计这个器件的人交流无疑是最好的选择。

5.4.2 销售代表

除掉生产厂家这一层后，你看到的就是销售代表了。这个人代表着想卖元件给你的生产厂家。他通常不直接从厂家支取薪水，而从代理生产厂家的代理公司那里获得报酬。他（或他的代理公司）通常从他的销售额中得到一定百分比的回报，一般在1%~5%左右，具体多少则取决于销售额的大小及其他复杂的计算公式，目的是为了让生产厂家花尽可能少的钱但却仍然可以最大程度地激励销售人员。

销售代表将同分销商一起工作，共同制订元件目录，给用户配送样品及完成其他类似的事务。他对于你能否使用他所代理的厂家的器件很感兴趣，但你不要指望他会给你提供一个替代方案，因为他与那个厂家的器件之间是一种金钱的关系。一般不容许销售代表同时代理存在竞争关系的几个厂家。我的经验是，代理

我这里所说的这种"呆伯特"风格产品的销售代表们，一般都具有某种工程背景。

5.4.3 分销商

"分销商和销售代表的区别在哪里呢？"有一次我问其中的一个人。得到的答案是"差别大约有15%"。

分销商要储存元件，他们所花的钱将作为成本的一部分。他们大约占有元件定价的20%，但这只是个大概的数字。实际数字可以有很大的差别，每一个具体的商业合同都可以不同。有些制造商则会强迫想要分销他们产品的分销商接受一个限定的加价空间。

我们这里有这么一个数一数二的大分销商，它在时刻注意着市场的行情，指望发现一些将来可能会越来越稀少却仍将有需求的产品①，然后跑去买下一大堆，囤积一段时间后再出售，以赚取利润。

有时生产厂家会采用总经销商，有些则采用多渠道的分销商。在采用多个分销商的情况下，最先代理某个元件的分销商在价格上将比其他分销商有优势。生产厂家这样做是为了表彰分销商在元件发布方面所做的贡献，以扩大业务。

分销商的最大优势在于其供应链管理。通过为客户缓冲存货，他们可以很好地处理订货量的增减，当订货意外增长时，他们可以缩短交货的时间。

分销商不太可能绑定于某一个制造商的产品，对于给定的问题，他们往往拥有多种解决方案。不过他们往往会引导你去使用一个既可以解决你的问题，又可以使他们自己获得最大利润的元器件。

分销商拥有工程背景的可能性比较小。他们中的很多人也许会购买本书，不过当看到我公开了他们的许多秘密的时候，希望他们不会苦恼。

5.4.4 现场应用工程师

现场应用工程师为分销商、销售代表甚至为生产厂家工作，你迟早是要跟他们打交道的。现场应用工程师起着几个方面的作用。首先，他是能够帮你把元件运行起来的那个重要人物。其次，他会关注你的应用，并经常给你推荐比较适合你的应用的元器件。最后，他们通常在你和分销商之间起着翻译的作用。因为当牵涉到技术细节时，分销商很难弄明白电气工程师们的实际需要，这一点大家都很清楚。

对于许多职场人员来讲，现场应用工程师是一个很完美的工作。他们拥有所

① 我这里故意玩点文字游戏，如果你明白我指什么，我也就无需解释，如果你不明白的话，那也无大碍。

有的方案，但对于某一个方案最终能否实际运行他们却不需要负什么责任。正是因为这个原因，有一段时间我做梦都想成为现场应用工程师。然而，这个工作也有不好的一面。一方面，他们很少能够见到最终完成的产品；另一方面，他们体验不到“出货推迟了，预算也超支了，但最终总算成功了”的那种满足感。

现场应用工程师经常需要接受厂商的大量培训，以了解元器件的工作原理。他们往往认识厂家的工程师并能够联系他们来帮助回答一些问题。

随着厂商在销售元器件上所下功夫的不断加深，它们不仅会开发新的元器件，还会为这些元器件创建一些应用方案。现场应用工程师与厂家的工程师经常会被派到用户那里去，给你展示一些很酷的小型应用实例，以说明某个元器件是多么多么地好。记住，这对于他们来讲，就像是在学校的实验室一样——他们只需要在展示的时候让其运行一次就行了。然而，产品的运行是完全不同的另外一回事，在你开始将他们推荐的元器件用于产品运行前，你一定要做足功课，对现场应用工程师的设计要进行彻底测试。

5.4.5 设计采用

这是在分销商与销售代表一起用餐的时候，吃开胃菜时会经常会听到的一个术语。当分销商从销售代表（也即生产厂家）那里注册了某个元器件的分销资格以后，从此该元器件就会在设计中得到实际使用，这被称为一个“设计采用”(design win)。你若细究这个术语，是不是会感叹工程师在用词方面是多么奇特呢？

记住，任何分销商只要注册了某个元器件，生产厂商就会在该元器件的出货上给他折扣优惠。这样一来，其他的分销商一般就很难在价格上赢过这个分销商。我说的只是通常情况，因为我也曾见过未注册的分销商的报价反而更低的情况，不过这种情况确实很少见。

另外一件可能发生的事情是，元器件的注册地位是可以转移的。如果你实在是不喜欢与某个分销商合作，并且你又是该生产厂家的一个足够大的用户，那么生产厂家可以将注册地位转移到某个你喜欢的分销商手里。然而，这种情况很罕见，通常是作为最后的手段。因为如果这种事情经常发生的话，那么让元器件尽快“设计采用”的动力就荡然无存了。

5.4.6 直购

如果你的订货数量很大的话，你可以考虑直购的方案。这意味着你直接向生产厂家购买元器件，跳过分销商。目标当然是为了得到较低的价格。

这样做也有它的不利之处，因为生产厂家往往有最小订货量的限制。此外，交货时间、条件等也比不上与分销商合作那么令人满意。如果你只是一个小人物的话，他们可能根本就不会考虑你的要求。

在你打算直购之前，要仔细考虑各种选项，因为直购意味着将元件的技术支持体系以及元件的供应链管理体系从你的设计日程中除掉。

有一些生产厂家根本就不容许用户直购，他们只有分销的政策。不过我碰巧知道一个秘密，就是这类生产厂家也会给分销商下达元器件的最终定价，以确保他们在市场上的竞争力。

5.4.7　总结

为你提供元件的人有很多。每个人都希望得到自己的利益，当然也会提供价值相当的服务。了解什么人做什么事有助于你利用好这些“人事”工具，这可以让你的工作更加容易成功。

以我个人的经历来看，越是成功的销售代表、分销商、现场应用工程师以及类似的人物，就越会经常去拜访你，了解你在做什么项目，并且当他们看到有你用得上的新技术和新点子的时候，一定会记得告诉你。他们会给你建议和方案，当然，他们甚至偶尔还会替你的午餐买单。

经验法则

- 销售代表依据合同给生产厂家工作。
- 分销商为自己工作。
- 现场应用工程师知道元器件怎么工作。
- 生产厂家希望把一个很酷的元器件卖给你。
- 有时你可以让生产厂家和现场应用工程师给你做部分设计工作。
- 所有这些人都可以帮你找到元器件和报价，他们一起工作以尽量给你提供最好的服务。

第6章 故障排除

完美的设计方法也不能保证生产中没有任何瑕疵。与我一起工作的一个工程师很自豪地说："只有一万件产品检测全部正常时，我才放心。"我曾经看到过已经正式生产了近50万件产品才发现生产中有容差问题存在的情况。这种情况是很难预测和避免的。

事实是，你对设计的分析越全面越彻底，等待生产的时间就越长，而如果产品从来就没有进入生产的话，那么谁都得不到收益（当然为政府工作除外）。因此需要在设计分析、测试及正式生产之间进行权衡。在你的职业生涯的某个时候，难免会有需要找出产品问题的时候。这时你将怎么办呢？你将采用什么方法呢？我衷心希望本章能够为你提供一些有用的思路。

6.1 排查故障前的准备

在讨论如何发现问题并解决问题的时候，我将利用自己的大量经验。我相信你也会有你自己独特的并且可能是完全不同的经历。我这里不是要指出你的设计中的问题是什么，而是要给你一些可以用来排除故障的指南。

6.1.1 科学鸟枪方法

我们稍后来解释这个有趣的标题。尽管有可能会造成顺序失当，但我还是觉得应该先介绍一条原则，因为这条原则对于其余内容的介绍是如此的重要。这条原则就是本章的第一条经验法则：不要做没有根据的假设（无论它看起来是多么地显而易见或荒谬可笑）。要尽力用实验去证明一个假设的对或错，然后才能基于它得出自己的结论。有太多的时候，人们会带着一种假设去思考，你根本就不会意识到这有可能会导致错误的结论。尤其重要的是，你要有一套程序来检查和验证一个假设。没有它的话，你会老是从一个主意跳到另外一个主意，而做不出任何结论。说完了这些，现在就让我们继续往下看。

谈到故障排除的方法，我将其分成两种常见的类型：

科学方法：做任何一个好侦探会做的事情——查找你拥有的线索，基于经验和知识，推断可能是什么问题。

优点：最终你将辨识出问题。

缺点：需要大量的时间和耐心。

鸟枪方法：往尽可能多的可疑点“放枪”，希望某一枪能够命中。在你运气好的时候，你很快就可以解决问题。

优点：运气好的话，很快就可以解决问题。

缺点：如果运气不好，你将永远兜圈。

尽管这两种方法各有其用处，但我的标题所暗示的（也是我推荐的）却是第三种故障排除方法，我称其为科学鸟枪方法，它是鸟枪方法和科学方法的结合。使用这个方法应该这样开始：

当某个问题第一次引起你的注意时，你要尽可能多地放“枪”。写下你认为可能引起该问题的所有因素。在这个过程中要利用你的直觉和经验。形象地讲就是，拿出你的鸟枪，选个目标开火。然后再让科学方法起作用，想办法对每种可能性进行估计和剖析，使其得到证实或者被排除。

根据我的经验，当使用科学鸟枪方法时，比较典型的统计情况大概是这样的：在每10次排错中，一般有7次的错误是比较愚蠢的，因此鸟枪方法可以比较容易、快速地找出来。譬如这样的错误：用了较老版本的软件，有个元器件没有装上去，或者一个保险丝烧了等等。在每10次排错中，大约有2次所牵涉到的问题会更加微妙，其解决需要进行反复试验，以找到一些新的数据并对它们进行评估。在每10次排错中，大约有1次，问题的解决需要花掉较长的时间，并且问题的最终解决需要反复地交替用到两种方法，其中用鸟枪方法来打开一些新的搜索区域，而用科学方法来进行验证或排除。总地来讲，当使用科学鸟枪方法时，通常可以兜最少的圈子即可使问题得到快速解决。也许在刚看到“科学鸟枪”这个词时，你会认为将“科学”和“鸟枪”两个词组合在一块没有什么实际意义。然而在消费品的世界里，使新设计的产品及时交货是头等重要的大事，科学鸟枪方法是能够给这个世界带来真正实惠的一种故障排查方法。

6.1.2　排除故障不难学习

你是否曾见过这种情况：一个工程师在诊断问题的原因时遇到了极大的困难，这时一个低级技工正好从旁边经过，并辨识出了故障部件的位置。你也许还见过这样的情况：一个技工为某个问题折腾了好几天，一个工程师仅看了一眼他的原理图，就对他说：“你的问题在这里。”

有些人在排查故障时会遇到困难，而另外一些人似乎拥有排查故障的诀窍。

如果你问他们怎么做才能这样快地解决问题，他们往往会一脸茫然，因为他们自己也不知道是如何能做到这一点的——他们就是能行！请相信你自己，即使有些技能不是那么容易学，但你也一样能够学会，因为我已经从那些拥有诀窍的人所能做到的事情中提炼出了一些经验法则。

6.1.3 始于易

在你列出了可能出错的因素之后，先从容易的开始处理。在我年轻的时候，我父亲传给我一个经验，这个经验跟随了我一生。为了寻找一个电气问题，他几乎将整个汽车的线路都重接了一遍。令他沮丧的是，问题出在了保险丝上。保险丝看上去是好的，但测量的时候却发现它是开路的。发生这种事情可能会令旁观者发笑，但它确实是人们容易遇上的一个陷阱。避免这种情况的方法就是要先检查容易的事情。芯片的引脚加电了吗（不要仅考虑电路板有电没有）？振荡器在工作吗？等等。

6.1.4 跳出专业看问题

由于在发生某个特定的问题时，通常会出现大量的小线索，因此很难断言是哪一部分出现了故障。使问题更加复杂的是，通常是由多种因素的共同组合引起了问题。

人类的天性就是喜欢将焦点集中在自己已知的领域，而其余的东西则如魔盒一般，他们不知道该从哪里入手。好的排障手通常是一个很好的多面手。他们对什么事情都了解一点，他们可以利用知道的这一点点知识将原因和结果联系起来。他们总想知道为什么这个是这样的、那个到底是干什么的，等等[①]。

有的时候，故障似乎没有提供什么有价值的线索。在我的职业生涯早期，有一次我们生产的一些显示器出现了问题。其中有一定百分比的显示器存在故障，上头让我找出其中的原因。当我把出故障的显示器拆开的时候，它却可以正常工作了。当我把它装回成一体时，它又出现了故障不能工作。我花了数小时的时间，压紧导线，查找冷接点，试图找出问题，但却只是徒劳。所以我坐在那里，瞪着PCB板发了一会儿呆。这时，我注意到有个电阻上有两个小印记，我很纳闷它们是怎么来的。经过一些检查之后，我发现当PCB板安装好时，有一个螺丝头会接触到这个电阻。原来是安装PCB板时，螺丝头会使这个电阻短路，从而导致了设备的故障。后来我把螺丝去掉，再装配起来，显示器就能够正确工作了。因此，

① 母亲无法忍受小孩的一点是小孩子总爱问问题。我对人性的这一点了解得很好，我有5个小孩！

不要犹豫，要敢于从你熟悉的领域之外寻找问题的原因。

6.1.5　注意细节

请尽量对一个问题的所有线索进行跟踪。在你的推理过程中，要列一份症状和线索的清单，以供参考。不要忽略任何细节，因为细节之中也许隐藏着线索，而这个线索能够将你引向正确的方向。下面是一个例子。

我负责的工程部曾经设计了一个电路，在测试的时候，我们遇到了随机的、难以解释的问题。测试工程师说，似乎是在我们开始采用贴片式PCB板设计以后，这个问题才开始出现的。我感到十分困惑，因为我看不出这个问题与新的设计之间有任何联系。忽然我想起来了，在我检视其中的一块电路板时，我曾发现有些细小的黑色纤维似乎把PCB板弄脏了。测试工程师一开始就没有考虑这一点，他将其看成是在电路使用的过程中，在环境里累积起来的小塑料丝（这样看也有道理，因为环境中有一个塑料做成的运动皮带，当其磨损的时候会留下这种黑色纤维）。他坚信这不会有什么影响。

然而，我明白在PCB板上有一些点，这些点哪怕是被数百兆欧的电阻短接，也会使电路反复出现我们所看到的那种问题。将这个事实与贴片式元件之间的间隔较近的特点联系在一块，我觉得发生这种短路问题就更有可能了。因此我坚持要求确定一下那些纤维是否导电。我们所做的第一件事情是收集了一些纤维样品，并将其靠近一个磁铁（基于这样一种假设：如果它是铁磁性的，那就有可能导电）。我们十分惊奇，因为这些原以为是塑料碎屑的纤维，竟然是含量很高的铁磁性物质。这让我想起了一个经典的物理实验，你把铁屑放在一张纸上，然后在下面移动一个磁铁，你就会看到磁场的作用。当我们把PCB板保护起来以防止其被弄脏之后，那种奇怪的现象就再也没有发生过。

在这个例子中，我们通过对以前被忽略的这些纤维加以考虑，再考虑到问题是从贴片式设计开始的，从而建立起了一个联系，并最终解决了问题。

6.1.6　对比排查

在你还是小孩子的时候，看过动画片《芝麻街》（Sesame Street）吗？其中我所喜欢的一集是“这些东西中的哪一个跟其他不同”。它教你辨别相似性，并从中挑出似乎不相配的那一个。这是一种十分重要的故障排除技能。所有的好技能不会只在电气工程师的世界里才起作用，它们可以用于任何问题的追踪。以下是我的资料里的另外一个事例。

数年以前，我家的制冰机不能制冰了。我打算好好研究一下，看到底发生了

什么。最后发现，水阀是由一个电磁阀实现的。对我来讲，这跟电是特别接近的。总共有两个水阀门，一个是控制进水的，另一个是控制排水的。我把这两个水阀弄了下来，发现控制进水的水阀里的橡皮垫圈受了点磨损。电磁阀压在了垫圈上面，堵住了阀门孔，并且橡皮垫圈上有些小块已经脱落，磨损比较严重。而当我查看控制排水的电磁阀（它工作正常）时，却没有发现橡皮垫圈磨损的情况，于是我明白了磨损就是这个问题的主要原因。

垫圈的磨损是不正常的，它与其他的零件不匹配了。因此我换了一个橡皮垫圈，再重新装配好，果然制冰机就能正常工作了。在这个例子中，技巧就是要找出似乎不对头的某个部件。为了做到这一点，有时你可以这样问自己："要是我设计垫圈的话，我会将其设计成开裂的吗？"在这种情况下，答案显然是否定的，因此垫圈肯定存在某种问题。

6.1.7 再谈估算

有些时候，我们好像有一半的时间花在了电路的设计上，而另外一半的时间则浪费在了寻找电路不能正常工作的原因上。

我们在第1章学习了如何对基本元件培养直觉的理解，其中的一个基本内容就是要培养估算的技能，从而可以对电路是否接近我们的期望作出评价。

估算在故障排除中同样也起着重要的作用。如果你擅长估算，那么你的直觉就会更加正确，就更容易指引你走上解决问题的正确道路。若将这种技能与现代计算机的功能相结合（甚至还可以同第5章谈到的电路仿真器的功能相结合），你就会拥有一组功能强大的诊断故障根源的工具。

6.1.8 故障重现

这是常被忽视的一个简单法则。当你已经找到并排除了故障之后，你还能使故障重现吗？也就是说，你通过移除所做的修补，使电路重新失去控制，并重现以前所看到的问题。

一般来讲（尤其是问题难于重复时），在工程师采用某个修补措施后，若故障看起来消失了，他就会以为自己正确解决了问题。然而，如果我们遇到的是个有点喜怒无常的问题的话（这种问题往往在你希望它出现时却不见得会出现），那么在你应用修补措施的时候，完全就有可能是问题碰巧自己消失了，而不是你修补的结果。依我的经验，这种情况是经常发生的，因此我建议你将修补措施除掉，看是否真地修好了。

自以为问题已经得到了解决，但刚刚把生产线开动起来，问题就又重新出现，

搞得你不得不马上再关闭生产线，这种情况不仅扫兴，还可能使你浪费很多冤枉钱，花在一些根本不需要、根本不起作用的修补上。因此请反复地拆开、修复好几次，然后才相信你已经解决了问题。

6.1.9　根源

好的排障手会系统地追踪一个故障信号直到其根源。当他做这件事情时，他会审视电路的每个部分，考虑它们是否工作正常。他会问自己这样的问题："这个运放的输出信号与输入引脚的信号一致吗？"

这就是真正的好工程师为什么似乎总在自言自语的原因。他们并没有患精神分裂症，他们只是在问自己大量的问题。当然，也许他们的行为有点古怪，但请相信我，这真的是一个好办法。

最后你终究会发现问题的根源——不正常工作的元件，然后你就可以分析出原因并使其正常工作。

6.1.10　问题分类

好的排障手会将问题分成几大类，有针对性地采用不同的方法来解决问题。

1. 设计问题

设计问题是最常见也最容易发现的问题，因为其通常具有可重复性和一致性。

解决方法：由于设计问题是可重复的，因此在你用工具（譬如示波器、万用表等）来跟踪问题时，应让问题表现出来。确保找到了问题的根源。

2. 容差问题

容差问题其实也是设计问题，但由于其通常不具有一致性、重复性，因此我给了它一个专门的名称。环境影响往往会使这种问题发生累积。

解决方法：如果可能，你应该想办法重建引起问题的环境。解决这种问题的一个好办法是仿真，在其中你可以改变受怀疑的元件的容差，看会有什么结果。

3. EMI问题

这类问题也是很难重复的。有谁知道EMI会在何时攻击你的电路呢？这种问题往往会难住很多优秀的工程师。

解决方法：这个问题实在有趣，我专门花了一节的篇幅来讨论它，马上就来！

4. 软件问题

如今采用软件或固件（firmware）的产品可谓多如牛毛。我曾看到有些软件表现出以上提到的各种症状，也曾看到过人们用软件的方法来解决上面提到的某些问

题（有时这些症状和问题在实际上是硬件的问题）。因此这里单独将其列为一类[①]。

解决方法：放弃，回家。虽然不能当真，不过这种问题类似一个短期内难以改造好的生理变态者，却是事实。再加之软件工程师似乎生来就惧怕示波器[②]，因此在诊断软件问题时，一定有你好受！这一个段落写得越长，我就越觉得有必要对这个问题进行单独的讨论，因此我在后面专列了一节，以对此进行详细讨论。

6.1.11 消除故障

既然你已经掌握了一些基本的技能，那就去试试——瞄准目标，把故障消除！

作为最后一个点子，在排除故障的过程中，应该记下你检查过的部分及你所做的结论。当你所查找的问题需要较长时间才能发现时，这一点尤其重要。当你正在建立自己的设计法则时，也应该这样做。在下次设计时，你可以参考这些笔记，从而明白哪些事情是不应该做的。

我知道这种笔记就像你学校里的那些不得不保存的、无用但却不得不写的实验报告书，它们确实必须保存。但有一点不同，请你记住，现在你无需靠这种笔记来决定能否升级。因此你只需将这些笔记保存到某个合理的程度即可。作些笔记，利用笔记，消除故障！

经验法则

- 不要做没有根据的假设，应该用实验来证明其正确或错误。
- 利用科学与鸟枪相结合的方法，尽快获得问题的根源。
- 从检查简单的部分开始。
- 跳出专业看问题。
- 不要忽略任何细节，同样，也不要做没有根据的假设。
- 寻找与众不同的东西。
- 利用估算和直觉，将自己引向正确的方向。
- 追根问底。
- 你能够使问题重现吗？
- 将问题分类，有针对性地定制解决办法。

---

① 这是一种隐性的问题，低劣代码中的问题往往很难解决。如果你能够用软件来修好硬件的问题，你就应该问问它的源头是否真是软件问题。

② 也许是我错了，不过我确实经常提醒软件工程师，让他们拿示波器来看看他们的软件产生出来的信号。

6.2　机器中的幽灵——EMI

你是否曾遇到过这样的情况，一个电路或设计出现了一些你所不希望看到的现象，而且出现的原因你也无法解释？更糟糕的是，它也许并不总是出现。难道它是在各大行星对齐成某种状态时才出现的吗？我告诉你，你的电路可能是撞见了EMI（发音如Emmy）的幽灵了。处理EMI问题确实是一门很难、很大的学问。这里有些“笔记精粹”①，可以奉送给那些想要学习这门课程的人。

EMI代表电磁干扰（electromagnetic interference），就是它妨碍了你的机器。我还记得自己第一次遇到这个讨厌鬼的情景。当时我们完成了一个显示器的设计，它在实验室里工作得很好，生产出来以后，在绝大部分情况下它也工作得很好。不过有大约20%的时间，当旁边有电机启动时，显示器上将出现混乱的画面。通过一整晚的反复实验，我们磕磕碰碰地终于找到了一个解决办法，产品终于又可以运行了。从那以后，我学到了不少找出EMI问题并予以解决的办法。我这里要介绍的一些经验，在与前面介绍的故障排除技术一起使用的时候，还是很管用的。工程师们一般都是在排除故障的时候才会牵涉到EMI问题的。我们应该正视EMI的问题，因为用不着我们去找它，它也会自己找上门来的。下面我们从EMI的定义开始介绍。

6.2.1　EMI的本质

从本质上讲，EMI就是你不希望看到的信号进入了你的电路。它仍是一个电信号，它仍然遵从欧姆定律。尽管它的各种行为看似是超自然的，但它仍然只是一个信号而已。这是一个好消息！这意味着你可以将这个魔鬼从你的设计中驱除，因为它仍然遵从物理定律。

6.2.2　魔鬼的招数

首先，EMI是怎么进入到电路里的呢？只有两种途径：传导的方法和辐射的方法。在第一种情况下，干扰信号必然沿着PCB板的走线或其他路径进入到遭受破坏的地方。在第二种情况下，信号无需导线就可以传播。重要的是，你必须知道信号是通过哪种方式进入到电路的，因为这将影响到你该采用什么样的解决方案。

6.2.3　传导的EMI

怎么知道一个EMI是传导的EMI呢？最简单的办法就是一块块地断开电路的连

① 原文为Cliff Notes®，是美国一个专门出版各学校指定教材的要点大纲的公司。——译者注

接，直到EMI消失为止。曾经有一次，我的一个电路板通过计算机声卡的音频输出口以及串口同时连接到了计算机上。我发现在喇叭里有一种烦人的嗡嗡声，其声调跟主板上连接的显示器的同步信号一致。当我断开串口连接时，嗡嗡声消失了。我们这里遇到的是所谓的“接地回路”问题，这是一种特殊的传导EMI。我通常的做法是，先查看问题是不是传导EMI，因为这最容易检查。如果你的设备是由交流线路供电的，请不要忽视连接到墙壁插座的连线，它也有可能是传导EMI的来源。我曾经看到过一个电路设计，每当接通头顶的投影仪电源时，电路就出问题了。

6.2.4 辐射的EMI

我所学到的处理辐射效应的最好办法，就是将它们分成两大阵营，一个是近端场效应，另一个是射频场效应。

可以对近端场效应再作进一步的划分，将其分成电流干扰和电压干扰。有这么一个经验法则：距离在一个波长以内的是近端场，距离在一个波长以外的是射频场。近端场的磁场会在电路中引起电流扰动，其电场则会产生电压扰动。

这里有个简单的实验，只需一样仪器，那就是实验室的示波器。让示波器的地线悬着，拿起探针，移向一个AC电源插座。调整示波器的电压范围，很快你就会看到一个很漂亮的60Hz的正弦波。在这个配置下，示波器探针本质上是一个二极子天线，它能够很好地对电场作出响应。

这时你会问，那磁场怎么测呢？磁场是由电流的流动产生的。学到现在，你应该达到这样一种境地：当你玩单词联想的游戏的时候，一旦你听到电流和磁场两个词，你就应该马上能够在脑袋里出现“回路”这个答案。现在就让我们把示波器的探针转换成一个回形天线，这只需将地线连接在探针的尖端即可。这时，你会发现前面那个来自电源插座的电压信号消失了。但你若将“新做出来的”这个传感器移近你正在使用的示波器的供电电缆或者其他有电流流动的设备，你就会发现示波器中会检测到磁场。一般来讲，你总可以用这种简单的技术来判断你所遇到的EMI的类型（你没有必要购买昂贵的探测器或频谱分析仪）。

一旦距离超过了一个波长，那么近端场相对射频场的优势就消失了，这时你将处理的就是射频场或射频干扰。你如何才能知道一个EMI问题是射频场的问题呢？请试着将可疑的干扰源移到一个波长之外，看问题是否仍然存在。如果仍然存在的话，就是射频场干扰。

总之，辐射EMI干扰可以分为三类：近端磁场、近端电场，以及远端场或称射频场。这样做的唯一目的就是为了便于确定该采用什么样的解决办法。从某种

角度来讲，所有三种辐射效应最终都必须转换成传导效应，才能破坏你的电路的运行。因此我们的窍门就是要阻止传导效应的发生。

6.2.5　处理EMI

无论EMI的来源如何，在你的职业生涯的某个时候，你总有机会需要从你的电路中驱除EMI这个幽灵。在介绍具体的内容（譬如应该在何时何地悬挂“符珠①”）之前，有一些基本的概念值得介绍，它们可以帮你把这些魔鬼放回瓶子里。

6.2.6　用破坏来证明你能够修复

记住EMI是由传导或辐射的某种电磁场引起的。通常它是以偶尔一次的方式出现的。这种特征使得它极难跟踪。因此我们要回顾一下故障重现的一些概念。如果你认为你真正解决了一个特定的问题，那你应当把修补措施去掉，看问题能否重现。破坏它，修好它，再破坏它，就跟我们在上一节所讲的那样。由于EMI令人讨厌的特性，这个法则就显得尤其重要。

这里有一个例子：有一次，我们使用的显示器出现了颤动问题，我的任务就是去消除这个问题。在我找出原因之后，我试着在线缆上放了一块铁氧体，问题消失了。我自以为把问题解决了，因此指示生产线给所有的机器装上铁氧体。你一定猜得到后面发生的事情。在生产线重新启动之后没多久，颤动又出来了。后来我发现问题是由电机电刷的换向火花引起的。我前面之所以得出错误的结论，是因为我放上那个铁氧体的时刻，碰巧是电机的电刷“自己”暂时消除了噪声源的时刻。后来我养成了习惯，我总要移去和重装维修补丁多次，确保问题能够相应地出现和消除。当我的工程师拿着一个修好的故障件回来时，我问他们的第一件事就是你是否去掉过维修补丁并且问题又出来了。

如果你不能随意地把补丁拆下来使故障重现，你也就不能保证自己真解决了问题。

6.2.7　时机就是一切

我所学到的另外一个知识，就是当电路出故障的时候，我们要正确地跟踪电路。有时你可能会临时离开一下，直到你有时间再回来接着搜索故障的根源。这时，当你往电路看过去的时候，可能你却看不到故障了，电路已经正常工作了。所以，我们必须把故障“逮个正着”。因此，当问题发生时，就不要等，抓起你的

① 我常用“符珠”（Juju bead）来指代铁氧体珠子或夹子。考虑到铁氧体魔术般地消除EMI问题的方式，因此这个称呼是比较恰当的。

"符珠"，快去抓鬼！如果有些问题发生在生产线上但在实验室里却没法重复，请不要奇怪。请到生产线去，努力找出其原因。在生产线的地面上可以发现很多的噪声（当那里有焊接机时尤其如此）。我们曾有一条生产线，其中有一张金属桌会干扰CD播放器，只要CD播放器在桌面以上2in之内，就会发生这种情况。该金属桌是通过一个支撑天花板的钢柱接地的。我知道接线盒的地同接地的建筑物钢构件二者之间可以有高达50V的噪声电压，因此我们就把桌子连接到接线盒的地上，问题终于消失了。我没有忘记试着移除修补措施来使问题重演。实际上，我做了好几次，以确保这就是问题所在。

要使EMI问题按我们的意愿发生是困难的，因此不要犹豫，要敢于在问题发生的时刻去问题发生的现场。

6.2.8 压力之下

有时我们迫于压力，必须尽快解决问题。为此，你可能会在获得解答之时，马上就移除一切补丁，以重现问题。这种做法是不合适的，正确的做法应该是：如果你已解决了问题，那么要试着一次去掉一块补丁，不要一次全部去掉。EMI问题往往是由多种因素组合而产生出来的，如果你每次试一个修补措施的话，也许会把能够解决问题的某种修补措施的组合给忽略掉了。例如，你也许需要在AC线上加0.1μF的电容，并在数据线缆上加一块铁氧体。因此，有时你需要同时用不止一种修补措施来解决问题。

6.2.9 要为意外做好心理准备

在AC电缆上跨接一个电容对于滤掉进入到系统的噪声大有帮助。这就是人们把电容放在平压装置中的原因。直到几周之前，这一点对我来讲还是绝对的真理。在几周之前，当我跟踪一个通信电缆上的噪声问题时，我注意到了一个奇怪的现象。当时我要求工程师把被测试单元插到一个平压装置上，而没有直接接到墙上的电源插座上，以观察通信线上的噪声。令我惊奇的是，噪声不仅没有降低，反而变得更大了。我现在都还不清楚出现这种现象的原委，过去我们可是靠它来改善滤波性能及数据可靠性的呀。因此，不要接受任何假定，要验证所有的问题。

6.2.10 不是每个元器件都产自同一个模子

在10MHz的频率下，1μF的电容与0.01μF的电容的X_c各是多少？让我想想，$X_c = 1/(2 \times 3.14 \times 10\text{MHz} \times C)$，因此先相乘，再消除指数，在经过一番嘀咕之后，你分别得到了0.016Ω和1.6Ω。按理说，较大的电容应该会使较多的噪声电流短路

到地上。但糟糕的是，这不是一个理想的世界，否则就真是那样的了。拿一本常用的数据手册翻翻，其推荐的是什么样的电容呢？一个大的配一个小的，是不是？这样推荐的原因在于：在高频下，较大的电容的工作特性跟较小的电容不同。理想的电容应该有相同的特性，但实际上没有理想的电容，只有理想的计算。一点提示：在选择电容时，要选择衰减频率接近于你想要夹断的频率的电容。

另外一点需要注意：电容上印制的电容值只有在电容的标定电压范围内运行时才正确的。我举以上例子是为了说明这样一个道理：你也许用对了元件，但可能没有用对数值。不过，没有任何问题是不能用实验来解决的。

6.2.11　控制环境

每个工程师都明白，拥有一个可控制的环境对于判断实验的正确性是十分重要的。然而在追踪EMI问题时，我却常常看到工程师们忽视环境的可控制性问题。这也许是因为EMI问题太难重现了吧。有一些标准技术可用于在实验环境中对EMI进行重现。如果你曾经对付过欧盟的CE要求，那你也许熟悉其中的某些标准，譬如EN61000-4-4。这个标准引用了一个试验，我发现其特别有用，这就是EFTBN试验。EFTBN代表*特快瞬态燃烧噪声*（Extremely Fast Transient Burst Noise）。对于发现电路设计中的抗扰性问题来讲，这是一个很好的试验。这个试验的历史要追溯到20世纪60年代和70年代。当时开发的有些基于时钟的IC在使用时似乎不够准确。没有人真正找到其干扰的来源，但人们发现如果所用的时钟信号能够通过他们所设计的一个试验，那么它就能够保持正确的时间。他们所设计的试验最终就演变成了EFTBN试验（EFTBN试验与其所取代的电弧试验具有类似的噪声构成。电弧试验则是美国保险商试验所的UL认证曾经采用过的一种试验）。还记得第4章讲到的锈锉刀试验吗？EFTBN试验就是它的官方版本。

在以上的同一个标准中，你还可以看到其他一些试验规程，包括静态试验、线路冲击试验等等。当你细读这个标准时，你会发现，进行试验的房间的湿度甚至也会对实验产生影响。要想把一个实验室装备得可以进行所有的这些试验，将需要花费极其高昂的代价。然而你若不这样做的话，那么在实验结果中出现某些不确定的变化就将成为很常见的事情。我个人在静态试验方面的经验表明，它是一个最难重复的试验，很难得到相同的结果。我曾经目睹过一个电路的测试，看到它通过了一个级别的试验，但同一块板在稍后几天重复完全相同的试验时，却得到了不同的结果①。

一点警告：仅仅通过所有的抗扰性试验尚不足以保证你的电路可以量产和出

① 这个例子告诉我们的是，在较潮湿的天气里电路较容易通过静态试验。

货，可能仍然会有问题会来缠绕你。在这种情况下，你需要设计自己的内部试验，以保证电路的正确运行。

6.2.12 穷人的EMI试验

如前所述，要建设一个完全可控制的实验室是极其昂贵的，租用也不便宜。若你的经费预算不多的话，那该怎么办呢？甩开膀子，把它忘掉？这样确实省事(尤其是在你正被其他的问题绊着的时候)，但这通常是很不可取的。

有一个法则，在我所学过的每一个学科中都一次次地重复出现。这就是85/15法则（也许你以前听到的是80/20或90/10法则）。它说的是，对于你想要的东西来讲，获得刚开始的85%跟得到最后的15%所需付出的努力是一样多的。这在EMI的世界里也是成立的。即使你没有一个完美的、可控制的实验室，你仍然可以了解到关于EMI的一些知识。你得不到的只是那个通过或通不过的结论。

前面我已经把锈锉刀试验当成是EFTBN试验的廉价版本，然而它不能控制，更谈不上安全。它是穷人的电弧试验。如果你穷得需要使用锈锉刀试验，我可不会对其造成的伤害负责，我也不推荐使用这个试验。我个人认为，你应该敦促你们公司同意掏钱购买EFTBN机器。你将不得不花上几千美元，但这将可以让你无需昂贵的屏蔽室和环境控制设备，就可以得到许多许多。此外，我也无需为工程师们在锈锉刀上来回摩擦导线而担心，因而可以睡得安心。

我也听说过一种廉价的静态试验，它使用的是从烧烤网架上取下来的压电点火器，它每次放电时的泵升电压可高达15~20kV。在干燥的天气里，一条化纤弹力短裤即可产生出5~10kV的电压（不过请注意，要是你的同事看到你穿着运动短裤来回走动，并在套着袜子的脚上夹着块PCB板做试验，那样子可是有点古怪哦）。

同样，比起建造一个湿度完全可以控制、地板接地的静电室来，你可以用便宜得多的价格购买一支静电枪，即可获得约80%你所需要的可控制性。线路冲击则可以简单地利用一个开关，通过启/停一台AC电机来产生。获得这种噪声源最常用的方法，就是去沃尔玛超市购买一台AC风扇。同样，你没法控制噪声的水平，但是你却可以知道你的设计到底能否抵御EMI。

总之，你应该尽你所能去检查你的设计。如果有可能，就请花钱购买一些试验设备（不过你没有必要像对外提供EMI测试服务那样，购买全副的装备）。这样一来，你就可以在自己的实验室里完成大部分的改进，从而在将产品拿到认证测试实验室去的时候可以节省大量的时间和金钱。

6.2.13　记录解决方案，积累经验

在处理EMI问题时，经验很有价值，不过你没有必要用很艰难的方法来获取所有的经验教训。你可以从别人的错误中学习。尽可能多地阅读相关的文献，但要注意的是，在EMI的问题上有很多不同的观点。不要把你在特定场合的发现当作普遍的真理。从EMI的性质和复杂性来看，它是很不好对付的。你会发现，你读到的一些方法对别人起作用，但对你却不一定起作用。处理EMI问题最好的方法就是，对于你自己找到的每个EMI问题解决方案，要纪录其理由和效果，经常引用并予以更新。要为你自己做一份“经验荟萃”！这就有点像保存实验报告书，是不是？在经过一段时间之后，你会发现有些解决方案对于你的产品特别有效果。有了这些信息的帮助，你解决起EMI问题来就要比以前快多了，费用也少多了。再经过一段时间的积累之后，你甚至会发现自己开始拥有了预知EMI对策的能力。我就曾半夜从梦中醒来，解决办法已经从梦中得到了。不过什么事情都不要做过了头，我想你肯定不希望自己所有的梦都是解决方案和PCB板。

6.2.14　空中的EMI

如果你想要阻挡的EMI来自外界空间，那么最有可能使用的解决方案就是某种屏蔽，即把你的设计放在一个导电性的盒子中。如果EMI是射频的，那么盒子上的孔径应该小于你所希望阻挡的信号的波长。

如果是近端场，则盒子可以有多种花样。有的时候，你只需在要保护的电路与噪声源之间放上一块接地板即可。对于磁场或者电流效应，铁磁屏蔽就有很好的效果。对于电压或者电容效应，用一些简单的导电材料就可以了。无论你的方法是什么，只要你想把噪声阻止在空气中，那就需要牵涉到某种形式的屏蔽并且需要进行大量的反复试验。这也是最费钱的方案。因此，我总是将屏蔽作为最后的选择。我总是优先考虑导线的方案。

6.2.15　导线中的EMI

最终，所有的EMI都将变成传导的。EMI只有变成传导的之后，才会使电路受到干扰。不管是处理近端场干扰还是射频干扰，最重要的一点就是，除非它干扰了你的PCB板中的某个信号，否则就没什么关系。因此学会处理传导EMI就变得极其重要。这也意味着PCB板及电路设计本身将会极大地影响EMI。

这里有些经验法则，可以用于PCB板与电路的设计，以阻止EMI在导线中传导。

1. 小电流信号更易受干扰

信噪比是用功率来衡量的，它跟电压和电流都有关系。在大多数情况下，电路的电压是不变的，而电流则可以变化。加之有限制功率的需要，因而使得信号电流特别小。于是问题就来了，若信号的功率很低，那么无需多大的干扰功率，即可使信号受到干扰。

举例来说，若有一杆4毛9分钱的喷水枪，那么只需将一个指头挡在其喷水口，你就可以改变其水流喷出的方向。但如果那是一杆灭火水枪的话，那你的手也许就没了。

在大多数情况下，当辐射信号被你的电路吸收的时候，其功率是不大的。因此我们可以较容易地用一个简单的方法来处理它。让受干扰的电路具有更大的电流和更大的功率——把电路变成一杆灭火水枪，这样就不容易被干扰了。

举例来说，若有一个传感器，它有一根4ft长的导线，在导线末端接了一个1MΩ的上拉电阻。现在将1MΩ的上拉电阻改成10kΩ大小的话，想想看会发生什么情况。这就是以前的4/10mA电流环特别可靠的原因之一。这种电流环很少会受到干扰。

如果你的电源无法提供这种额外的电流，那么你需要使用一个这样的元件，这个元件应该对需要抑制的高频率具有低阻抗，而对于信号运行的低频率则具有高阻抗。这种元件确实存在，它就是电容。将一个电容接在有问题的器件的输入端，使它成为需要抑制的特定频率的一个负载，这样一来，不需要的信号就难以干扰我们需要的那些信号了。

2. 找出天线并予以破坏

增大信号功率的办法十分有效，但当干扰信号和需要的信号具有相同的频率时，它就无能为力了。在这种情况下，你需要考虑应用天线这个概念。

在电子学的世界里，每样东西在本质上都可以看成是天线。天线的好坏是问题的关键。下面先让我们来看看到底什么是天线。

天线是一种设备，它将辐射场转换成传导的信号（或者进行相反的转换）。天线有两种基本类型：一种是二极子天线，由一个地和一根长导线构成；另一种是天线环，你猜得到，它就是一个金属导线环。前面我们已经介绍了如何把示波器的探针引线转换成这两类天线，以探测所存在某些EMI信号。天线环特别适合于拾取磁场效应，而二极子天线则能够较好地处理电容效应。对于射频场，有大量的方程和加载公式深入地描述了相关的性质，但这已经超出了本书的范围。对于我们处理EMI问题来讲，知道两类天线都能够很好地拾取射频场就足够了。

电路设计中的一个窍门就是要能够辨识天线。一旦你发现了天线，接下来你

就可以想办法来处理它。

有些时候，在你检查电路中的传导效应时，可能会碰到某个未知的天线。例如，有时当你拔下某根很长的导线时，问题就消失了。这就是天线在作怪。我曾经有过多次完全相同的经历：当我把用于放电的一些触点拆下来后，问题仍然存在，只有当我把引出这些触点的导线也拆下来之后，问题才会消失。这就是把天线拆了下来。插在电路中的线束容易构成二极子天线。阻止这些天线在较高频率下起作用的一个方法，就是在上面放置铁氧体磁珠。现在你应该明白如今好多的导线上面为什么都要放置小磁珠了。

在PCB板上经常会有天线环。频率越高，引起问题所需的天线环面积就越小。通常，天线环的面积越小，你的设计就越好。如果你有余钱，那么有一个方法可以利用这一特性，很容易就可以改善电路的性能。这就是采用4层的PCB板，将其中间的某一层作为地平面，将中间的另一层作为*Vcc*平面。采用这种方法以后，天线环的面积将达到最小。如果你没有钱去做4层的PCB板，那么你就需要有耐心去学习如何用单层或双层PCB板做到同样的效果并进行大量的实践。在这种情况下，我强烈建议你去修一门PCB板设计的课程。有很多教师提供这方面的课程。

作为一般性原则，好的辐射器也是好的接收器。这就是说，你可以启动你的电路，并使用示波器的探针，来找出PCB板或线束上的“热点”，从而明白问题到底在什么地方。如果你想得到更加精确的结论，那你可能就得花些钱去购买近端场设备和探头设备。总之，要找出你电路中的天线并破坏它们，以此来阻止EMI。

6.2.16　结论

EMI问题没有简单的处理方法，是经验在统治着这个领域，因此在尝试解决EMI问题时，请不要害怕动手。我这里对EMI的介绍尚谈不上全面，在这方面读者自己就可以找到很多其他的书籍。不过我要提醒你们，不可能人人都认同同一个方法。你必须针对自己的产品，去发现自己的方法，并使用这些方法来解决EMI的问题。

一点说明：电气产品的辐射标准变得日益严格，并且这种趋势还看不到停止的迹象。当你尽力去通过这些辐射标准的时候，你试图把外面的EMI阻挡在外头的努力，也会把你电路里面的EMI阻挡在里头。

请将电路设计得难于被干扰，并找出那些未知的天线予以破坏，如果这些方法都不行，请屏蔽你的电路。

遵从下面的经验法则，将幽灵从你的机器中驱除。

经验法则

- EMI有两种类型：传导的和辐射的。
- 辐射效应可以分成近端场效应和射频场效应。
- 近端场效应有磁场性质的和电场性质的。
- 辨识你所处理的EMI类型可以帮助你形成解决方案。
- 从拔掉或拔下任何可以拔的部件开始。
- 你的维修方案可以重复吗？移除维修的补丁能使问题重现吗？
- 在问题发生的当时当地追踪问题。
- 记住元器件不是理想的。
- 做一份解决方案的纪要。
- 小电流信号更容易受干扰。
- 找出天线并予以破坏。
- 给二极子天线加上负载。
- 使PCB板上的天线环面积最小化。
- 良好的辐射器也是良好的发射器。
- 如果所有其他的方法都无效，请屏蔽电路。

6.3 消除漏洞的对策

我们的世界越来越依赖软件了。我这里所说的软件包含了固件（firmware），固件实际上就是一种很少去改动的软件。软件到处都是。在大多数情况下，即使是好用的老式模拟电路也在采用软件来显示和设置。软件是一个好东西，因为它带来了很大的灵活性，提供了许多新的功能（没有DSP的话，我家里的立体声功放就不会是现在的样子）。不过软件的使用是有代价的。这个代价就是，我们今天的世界充满了软件漏洞！

6.3.1 无漏洞的软件也许不存在

如果我们谈论的是二十行的代码，那么很容易使其没有漏洞，但对于有一千行的代码呢？甚至于有一百万行的代码呢？代码越多，要使其没有漏洞就越困难。虽然我无法像爱因斯坦那样进行证明，但我想道理应该跟相对论是类似的——你离光速越近，要继续提高速度就越困难。要达到光速几乎是不可能的，同样，代码越多，要做到无漏洞也就越困难。

你的代码没有漏洞的几率到底是50%还是99%，这主要取决于一个因素——你在软件测试上所花的时间。代码的功能越多、复杂性越高，所需的测试时间就越多。漏洞的多少与出货时间的早晚是一对矛盾，你必须在二者之间进行权衡考虑，选择一个可以接受的漏洞水平及出货时间。由于现在的消费者要求所有的商品都具有尽可能低的价格，因此我们创造了一个可升级的世界。你可以现在就购买我的可能有漏洞的软件，并在以后对其升级。这种情况已经在许多日常用品上出现，而不再局限于计算机产品。我已经对我的PDA进行了好几次软件升级，我刚刚发现我的PSP又有了一个新版的OS可供升级，我的GPS导航仪则起码进行过两次软件升级。

因此，如果你的代码非常庞大，并且还必须做到毫无漏洞的话，那么你所需付出的代价将非常高昂，而且还需要花费大量的时间。航天飞机的代码就必须做到毫无漏洞，在所有的代码中，它们可以说是每行成本最高的代码。

这也是大的软件公司（例如以字母M开头的软件公司）卖给你代码（其实你从来没有真正拥有它），却不为软件的故障负责的原因。如果要软件公司负责的话，这只会使软件变得十分昂贵，以致没人买得起。软件永远难以达到真正的完美，但它可以做到足够好。不过，“足够好”是完全主观的评价，它到底代表一个什么样的程度完全取决于你和你的公司。下面介绍的这些方法，可以用来排除代码故障，并帮助你判断代码是否已经足够好，可以出货了。

6.3.2　大量而全面的测试

好的代码需要进行大量的测试，对这一点你应该心中有数。我特别喜欢对软件进行人工测试，这需要准用户的参与。用户似乎总能“发明”出一些设计者们意想不到的方法，致使软件故障。

然而，人工测试有一个问题，就是试用的人往往记不住故障是什么时候发生的，发生时他到底做了什么。记忆是变幻无常的，在辛苦的测试过程中，你往往对设备发生异常时自己的所作所为记忆很差。在我工作过的一个地方，我在测试室里装了一个摄像机，来监视试用人员。这样一来，我们就可以重放磁带，看软件出现故障的前后到底发生了什么。这样可以免除我们走入死胡同的麻烦。

6.3.3　重现问题

跟大多数难以追踪的问题一样，难于重现的问题往往也最难被发现。对软件来讲，需要一系列的条件都满足时漏洞才显现出来的情况并不少见，例如某些按键的组合，或者定时等等。假如你正在追踪一个漏洞，并且你碰巧让其重现了出

来，那么请停下来，回忆此前30s的情况，看你能否让其再次出现。不管使漏洞显现出来的是什么操作，请试着对其作少量变动，直到该漏洞重新出现为止，然后再多试几次。不断地尝试，直到你想它什么时候出现它就什么时候出现为止。如果你能够使其按你的意愿出现，那么对它的跟踪就将容易得多。

6.3.4 设置追踪器

在代码中，我们可以设置一些追踪寄存器，来保存关键的追踪信息，以帮助你判断到底错在何处。这可能需要额外增加一些开发时间，但是在跟踪过程中这可以带来巨大的回报。

有一次，我们的控制面板遇到了一个问题，它会按随机的时间间隔重启。因此我们建立了一个寄存器，来保存堆栈深度的信息，以跟踪堆栈的情况。通过观察，我们发现堆栈变得特别大，覆盖到了代码的其他区域，它会一直“心不在焉”，直到看门狗定时器计时结束，从而引发重启。

一般来讲，如果有显示器的话，你可以用它来显示这些信息。然而，有时你可能希望能够比显示器刷屏还快地看到信息，或者显示器不能显示你想看到的信息。在这种情况下，你应该建立一个D/A转换器——包括一些电路和信号，它可以接受你的微控制器中的任何寄存器的内容，将之转换成一个模拟信号，以供示波器观察。

在使用D/A之前，你必须先对其进行跟踪调试，在获得一定的信心之后，才能正式使用。你可以这样做，把任意一个数加载到你定好的寄存器，观察示波器，看是不是你所要的波形。一旦其工作正常，你就可以像硬件工程师一样，用它来做类似的根源追踪分析。这个方法的原理就是：把不同计算阶段的一个个数“接到”示波器上观看，从异常的输出点开始一直往回跟踪，直到发现问题的原因为止。

这个方法可以和简单的RC电路、串行D/A或其他多种方法一起使用。有些芯片甚至本身就内建有某种跟踪器。其要点跟前面讨论的相同，就是都要使用根源追踪分析。不过在这种情况下，在软件运行过程中的任何点上，芯片的内部到底发生了什么事情，你应该心中有数。

6.3.5 再次破坏

同跟踪硬件问题一样，“再次破坏”也是确保你真正解决了某个软件问题的重要方法。如果你能随意使某个软件故障出现和修复，那么你应该是发现了一个漏洞。在使用闪存芯片的情况下，这是很容易做到的事情。但是在过去使用OTP和

EPROM作为存储器芯片的时代，你必须等待很长的时间（几乎需要20min），才能在较高的电压下将芯片上的代码擦除掉重写。

6.3.6 捉虫

尽管我打心底里是一个顽固的模拟派，但我知道软件在近期内是不会消失的。因此我们还得忍受这样一类的事实：DVD需要很长的时间启动和读取碟片，其时间比30年前电视机预热显像管的时间还要长。

事实是代码已经成了一种生活方式。我们甚至都开始教育孩子们如何去应对“将来需要编写代码”这种转型思维了。看看他们在玩的视频游戏吧。我想我都必须升级自己的脑袋瓜以后，才能玩得来这些游戏了。而在若干年以前，我从老式游戏机中赢得的角子比起大多数的同龄人都要多。

回忆再多也没用，软件已经在这里，并且会一直存在下去。除非因特网近期就拥有意识并能够自己跟踪调试，否则的话，“捉虫”就是我们的工作，因此祝你“捉虫”时有好运。

经验法则

- 做大量的测试，用某种方式来纪录信息，不要指望人类的记忆。
- 回忆30s之内发生的事情，试着使问题重现。
- 设置跟踪器，利用芯片的跟踪功能。如果没有，自己建一个。
- 反复破坏和修好软件故障，以证明你发现了漏洞。

第7章　人 际 沟 通

这是本书有些敏感的部分。但是千万不要避而远之，请继续阅读下去。大多数“普通”人会觉得那些属于电气世界的人很有点古怪。是的，若不是这样的话，美国的卡通人物呆伯特（Dilbert）就不会有滑稽好笑的看头了。从电子电气工程师的观点来看，似乎外界常常对他们缺乏了解。如果你想成为尽可能成功的工程师的话，那么在你的技能清单上，就应该包括一些人际关系技巧。不错，这些技巧最容易被人们掌握，但真正拥有这些技巧的工程师却十分稀少。

7.1　人际关系技巧

在工程师们与人打交道时常常感到的一个困难就是，没法像我们处理的各种电路那样，用简练的数学公式来描述人与人之间的相互关系。我个人认为，这就是我们经常看到一个个的工程部门往往都由非工程的人员来管理的原因。那么你应该做些什么呢？我所发现的一个事实是，尽管没有完美的方程可以用来描述人，但你可以将人分为若干类，这对于你理解他们以及跟他们打交道都有帮助。

在任何商业机构中，都有一个等级森严的体系——这里没有平等的圆桌。某个人会坐在上头，其他人则依次排开。即使在企业的组织结构图上看不出什么等级，但讨厌的等级也仍然存在着。让我们把企业中的人员按相互作用关系分成不同的级别，这无疑会影响到你与别人互动的方式。就让我们从顶头开始吧。

注意我在描述人员划分时用的都是男性代词，这仅仅是为了方便。其中谈到的人员当然既可以是男性也可以是女性。也许有一天我们可以发明一些中性的代词，它们很难冒犯人但却可能招来大量的笑声。到了那时，我肯定会尽情地使用这种中性代词。

7.1.1　上级

这是指你的老板，你要汇报的人，以及为你的所作所为负责的人。当然这是在完美世界中的一个定义[1]。首先我送你几条通用法则：

[1] 我很清楚有许多这样的老板，在你做了好事时，荣誉都是他们的，而在你出错的时候，他们就会把所有的责难都加在你的身上。我真诚地希望你永远不会碰上这样的老板，不过要是已经有一个这样的老板作为上级的话，那就请继续读下去，以获得一些经验法则来帮助你。

避免说打击你老板的话，即使他活该，你也不要这样。因为连续不断的牢骚和抱怨，往往伤害你自己比伤害他更多。

保持正直和真诚。有时撒谎和欺骗可以让你暂时领先，但最终，每一次这样的行为都会回过来纠缠你。

帮助你的老板成功。有时这样做很难，尤其是当你的老板从来不把功劳记在你头上的时候，但即使这样，你也应该做一个好雇员。总有人会注意到你的表现的。

下面给大家介绍几种类型的老板。

1. 职场型老板

这种老板比较无能。他对你做的事情没有什么见解，他关心自己的职位多过关心公司的成功。为了掩饰自己的过失，他会毫不犹豫地牺牲员工。这种类型的老板会把你做得对的事情全算作他的功劳，把搞糟的事情全归在你的头上。遇到这种老板，首先你应该尽可能地做好你的工作。假若你是一个有价值的员工，那么他的个人利益就需要你伴在他的左右。其次，在管理层的其他人看得到的地方，要抓住机会展示你的技能。这将抵消他试图把你的光芒罩起来的努力。如果可能，就从他的部门转出去，因为要同这种老板长久相处是很难的事情。

2. 谈判型老板

这是销售员一类的老板，是超级谈判专家。他总会把目标设置得远高于合理的水平，指望这样可以激励你干出你自己也不敢想的事情。遇到这种老板，首先你不要因这种要求而感到气馁。接下来有两种方法可供你选择。一是自己也做一个谈判者——把完成工作所需的时间、金钱也做一番高估，以使自己有谈判的余地（就像《星际旅行》中的指挥官Scotty应付舰长Kirk一样）。另一个选择就是告诉他你能做到什么并坚守自己的底线。虽然在你达不到你所许诺的目标时，谈判型的老板会感到失望，但在你同他谈判时，也不要低估了自己的能力。谈判者不一定就是个坏老板，换你去做的话可能会做得更糟。“宁可高标准而不及，也不低标准而求全”，就是这类老板的信条。

3. “老好人”老板

“老好人”老板就是顺从的老板。他和自己的老板谈话时会尽量投其所好，一般不会为他的员工辩护。要是这类老板交代你去做不可能完成的任务，给你设置不可能赶上的交货期限，你不要见怪，因为这种情况并不少见。在一个“老好人”老板的面前，不要自己也犯“老好人”的错误——这是一种灾难性的组合。应该让这种类型的老板知道真正将要发生的情况。如果你有强势的个性，那么在这种老板对他的老板说“为了完成某某任务应该怎么怎么做”的时候，你可以在一旁

支持他以使其得到帮助。一般来讲，这种老板会把你的成功和失败都归在你自己的头上。

4. 微观型老板

这种老板总想管理每一样细节。对于他让你提交现状报告及对报告进行更新的要求，你应该尽快加以处理，以便有时间回来处理业务。在你试图自己作出决定的时候，他可能会很不高兴甚至于十分恼火。

我认为与这种老板打交道的最好也最简单的办法就是，你要确保准时提交那些报告和更新。当然要尽可能地做到可靠，以便赢得这种老板的信任。通常与这种老板谈话是比较轻松的事情（你跟这种老板肯定会有大量的面谈机会）。要经常跟他谈你的优点优势，并且要使自己的言行跟他的部门目标保持同步。只要这类老板没有将"事必躬亲"进行到极端，被微观型老板管理就算不上最坏的情况。

5. 宏观型老板

与微观型老板相反，宏观型老板是这样一种老板，当你真正需要某种帮助的时候，他永远不在你身边。你很难联系上他，跟他交谈的机会更少。这就使得很多艰难的决定不得不由你自己来作出。情况往往是这个样子：你反复地针对某个特别的议题，向他请示意见，但他却没有回复，因而你不得不自己作出决定，但最后你却可能要受到他的批评。

在这种情况下最好的一点就是，你可以利用这个机会学会自己做决定。你可能会把事情弄糟，但这是作任何决定都必然要冒的风险，所以不要害怕犯错误。如果你的老板对你作出决定的理由有疑问，你应该尽量把作出决定的过程给他解释清楚。记住是因为他对所有的事情都撒手不管，你才不得不作出决定的。不要以为他了解你所做的事情的背景。这种老板的最大好处就是，你有很多表现自己的机会。你会有很多绳索，但要防止吊死自己。

6. 完美的老板

最好的老板，他会把你的成功归在你的头上，他也会为你所犯的错误承担自己的责任，并给你学习和成长的机会。如果你遇上了这种老板，你应该努力争取成功，你也会成功。你千万不要错失这个机会！通常他会给你大量的空间去争取成功。他们会认识到他们的成功有赖于你，他们会帮助你成功。如果他们因你做的某些事情而得到了荣誉，你千万不要恼火。如果他们是好老板的话，是他们为你创造了成功的环境，你才得以成功的。通常当这种老板成功的时候，你也会成功，因为他们会带你同行。

7. 老板的老板

你跟这个人打交道的机会可能不多，但当你有机会跟他打交道时一定要小心。

作为普通员工，这是最抢眼的事情。不要太过紧张。我还记得有一次应付公司CEO时的经历。当时我们的生产线因一个电源的问题停线了。那时我是QC部门的一个低层兼职学生技工。当他过来查看到底是怎么回事的时候，我正好分析出了问题的原因。当我给他说明故障原因的时候，我的腿直打哆嗦。开始他不相信我所说的，因此我当着他的面将一个电源弄坏，修好，再弄坏。他终于满意了，生产线又启动了。经过了两三次这类的事情以后，CEO就知道了我的名字。在那种情况下如果我惊慌失措的话，那么即使我做得再好，也别指望他能记住我。

8. 总结

在考虑与老板的互动时，有一点需要指出，就是这些老板的分类不是绝对的，每种类型都可以有一些变种。总之，就如我们刚开始所说的那样，对这些人物进行分类不是一门精确的学科。如果你的老板是这些类型的某种组合，那么你也许就得把自己对他们的反应也组合组合。

7.1.2 同级

这些是你的同事、你的难兄难弟，有时也是你的敌人。在你的人际关系网中，这一层是能够为你的未来创造机会的最好地方。以下是这一层的一些类型。

1. 奸猾贪欲者

当心奸猾贪欲者！他总在寻找可以带走的东西。他只在老板看着的时候才努力工作。不要牵扯进他的任何利用公司的计谋。这往往不会有好结果，还会使你也戴上奸猾贪欲者的恶名。

2. 沽名钓誉者

他在工作中是一个真正的政治人物，对他来讲，建立权利和名誉十分重要。可悲的是，为了达到这个目的，他可能会让你看起来比较差劲。不要给他以任何把柄，免得他用来证明你做得有多差，从而使他自己看起来比较好。你可以同这种人结成十分可靠的同盟，但这是一种互相利用的关系。如果你跟这种人打交道，你就必须坚守你的契约，因为只要他自己的利益得到保障，他就会坚守他的契约。

3. 敏感如獾者

这类人容易对环境作出情绪化的反应。如果他感觉受到了攻击，他就将进行反击，并且会像被逼到角落的獾一样地生气。最好的办法就是作出让步，给他机会平静下来。如果你能够帮助他们平息情绪（或者等待其怒气过去），通常还是可以同他们讲理的。在这一类人中，工作狂并不少见。也许这就是他们的脾气为什么如此坏的原因吧。

4. 平凡一族

公司里满是平凡的人。这些人做事正派得体，默默无闻，但却十分可靠。我相信如果不是这群平凡的人，公司将永远无法形成并保持团结。这些人贪图安全，喜欢将困难的决定给别人来做。他们往往会问你他们应该做什么。

平凡的人喜欢有人领路。如果你能够得到他们的尊重，其他人也就会注意到，这样就有可能使你得到提拔。

5. "射击"能手

这就是能够成事的那些人。他们工作努力，但又没有把自己变成敏感如獾的人。他们可靠，并且常常能够作出正确的决定。"射击"能手诚实而正直，并且期望着公司的成功。当他们的才能得到认可时，他们往往能够得到提升。在公司里这类人是值得交的好朋友。希望你在读完本书以后，也能成为人人都想把你当成自己人的"射击"能手。

即使公司的组织结构图上可能没有他们的位置，但他们通常却是领路人和真正的指导者。只要有可能，你就应该听听这些"射击"能手们的建议。

6. 结论

在这一层中，最重要的一件事情就是要懂得尊重人，尊重你自己，也尊重与你打交道的人。你通过遵从自己的承诺来赢得别人的尊重。要坚守自己的诺言。如果你犯了错，要说出来，改正它，然后再前进。要给别人对你形成尊重的机会。这种互相尊重是建立人际关系网络的一个方法，二者会自然同步成长。这里也是彼此互相帮助共渡难关的地方。彼此互相帮助，你们所取得的成功将会比单干大得多。

7.1.3 下级

你可能期望有机会去领导一群人，或者已经有一群人压在了你的肩上需要你去负责。无论怎样你最终都会拥有一些由你负责的下属。对于真正的工程师类型的人来讲，这往往是一个最困难的转变。由于在组织结构图上那些比你低的人会互相作用，因此你会对他们所表现出来的行为和个性特征感到困惑。以下是对这些下属的一个分类。

1. 精明的"懒鬼"

这种人通常很机灵，他能够比同组的其他大多数人更快地完成一项任务。因此，他们往往有一些自由时间，而其他人却没有。但是他们不会主动去找更多的工作——他们会混时间或者把时间花在上网或干其他事情上。通常，他们按键的动作很快，当你从附近经过的时候，他们会飞快地切换回工作屏幕，装成工作很忙的样子。要把他们的任务加满。如果偷懒成了大问题，你可能就需要把他们叫

过去好好谈谈。

2. 需要夸奖的人

这些雇员往往想知道你对他们每天工作的评价是怎样的。他们期待得到正面的肯定和一些夸奖。当他们工作做得好的时候，请告诉他们你的感觉。当他们犯了错误或应该尝试不同方法的时候，请不要害怕给他们提供一些建设性的意见。当他们已经完成手头的任务可以承担新的任务时，他们通常会主动告诉你。

作为老板，有时你可能希望他们不要老是打搅你，因为他们似乎有点儿离不开你的味道。如果他们是有用的员工，就在他们需要的时候花上几分钟。他们将因你所花的一点时间而对你十分忠诚。如果他们不是很好，就不要理会他们，他们会在其他地方找到新的工作，替你解决掉这个问题。

3. 无用之辈

这就是那种贡献不多的人。你在他身上的付出比你从他那里收获的还要多。不过我坚信这种人是可以改变和提高的。我喜欢给他们一个机会，不过在许下自己的期待时，你要表现强硬。让他明白为了继续他的聘用，他应该付出什么。然而，你不可能永远这样期待下去而不浪费公司的资源。因此，如果他还不改变，那么这就是那个需要你作出艰难决定的人，你不得不让他走人。不要让你的部门无休止地浪费资源，长久下去你们彼此都会受到伤害。

4. 平凡一族

这一类在前面已经谈到过——你应该成为他的一个领路人，教导他如何变得优秀，你也许可以将其变成一个“射击”能手。

5. “射击”能手

这一类我们也已经在前面谈到过。在你的部门中，这种人越多，你工作起来就越顺利。不要害怕给他们荣誉，不要试图压制他们或把他们当成你的苦工。那样只会引火烧身。要把荣誉跟他们分享，把重担加在他们身上，这样他们才会把你带到终点线上。

6. 总结

真正能干的管理者是否真的能够将一个平凡之辈转变成一个“射击”能手呢？或者能够将一个无用之辈转变成某种更有用的人呢？我是认同这一点的，并且我还认为，能够做到这一点正是一个好管理者的标志。任何人都可以吆喝和胁迫人们去做某件事情，而采用说服和启发方式的人则比较稀少，当然也就更有价值。他的团队将更有效率，会比较少发生人员调整，因而会完成更多的工作。这并不是说你应该做一个感情用事的人，有时你也需要强硬，但是你若真的在乎你的员工，那么这种管理思路将会让人耳目一新。

7.1.4 行政助理

每个机构都有一个内部的通信方式。在大多数情况下这是通过助理来实现的。同秘书和助理们建立起良好的关系是一个好点子。这将使你进入到一个完全不同的交流网络。如果他们对你有好印象，你就会在你的上级那里得到较好的名声。只要可能，要尽量帮助这些助理们，要尊重他们。大量不为人知的大事都跟助理们有关。

经验法则

- 尽可能在完美的老板手下工作，如果不行，那就在你现在的老板手下好好工作。
- 要赢得员工中的平凡之辈的尊重。
- 要跟"射击"能手搭上关系。
- 自己也要做"射击"能手。
- 混合类型的人，要用混合类型的方法去应对。
- 要给无用之辈一个机会，如果他还不能进步，就让他走人。
- 将平凡之辈转变成"射击"能手。
- 尊重行政助理。

7.2 做一个外向的内向者

我个人感觉，一般来讲，在工程界中表现较好的人在个性上似乎都是非常害羞的。我不得不说，电气工程师也许是这一群人中最内向的了。我曾经被问到："你如何知道正在同你交谈的工程师是一个外向的人？"答案就是："他看着你的鞋子而不是看着他自己的。"

这个答案很古怪但却是真的。如果电气工程师能够克服内向的倾向，他们就能够得到很多的好处。这可是千真万确的。下面提供了一些方法来供大家克服内向的倾向。

7.2.1 一切都取决于你的观点

一个智者曾经说过："你会发现对与错常常取决于你的观点①。"下面我将尽量

① 这是影片《星球大战》中的绝地武士欧比旺 · 肯诺比（Obi Wan Kenobi）说过的话。从《星球大战》中可以学到很多伟大的生活哲理。

从最平常的视角出发，给你提供一些方法和点子。在这个讨论中，我将把工程师称作苦力，把经理人称作竖发人。

1. 苦力的观点

对于一般的工程师来讲，管理层的决策和方向就像古埃及的象形文字之于普通人一样难于破译。在与竖发人打交道时，典型的电气工程师的脑袋中的想法大概是这么个样子："为什么在昨天的清单上还是最不重要的事情，在今天却成了世界上最重要的事情了？"或者："为什么你就不明白'不可能'的情况呢？"

在我早年做"苦力"的日子里，我常感概："管理层是多余的魔鬼。"这精确地表达了我当时在这方面的想法。当电路不能正确工作时或者代码不能正常运行时，如果经理不能帮我弄好，那他的用处在哪里呢？他肯定会不断地骚扰我，要求我递交进展报告之类的文档，难道我就不能自己计划自己的时间吗？

即使对于那些觉得经理讨人喜欢、对他们的工作很有帮助的工程师们，也仍然会在理解管理层的决策方面存在着一些困惑。这通常是由于大家对决策过程的背景缺乏了解造成的。一个好的经理常常会对自己作出决策的过程做一些说明，以化解这种局面。因为工程师们虽然在社交方面可能往往不够成熟，但他们仍然能够理解数字和推理！

相对于经理的角色，工程师对于自己的角色作用存在着一种自然的焦虑。不过无论如何，在这两者的关系中，工程师毕竟是雇员，经理最后仍然是他的老板，而不是倒过来。请记住，工程师终其一生都在问"这是为什么？""那是为什么？"他们就是被训练成这个样子的，正是这一点才能够使他们成为好工程师。如果你是经理，就应该帮助他们回答这类问题。

2. 竖发人的观点

首先，让我们了解一下管理的首要目的是什么。这是为了让业务成功！也可以说是为了让被管理的部门表现良好。这两个目的通常是一致的，当然为了后者而牺牲前者的情况要除外（在一个无良的经理领导下，这种情况是有可能发生的。但愿他的老板能够早点发现并且在还来得及收拾局面之前及时予以纠正）。

一个好经理需要公司成功——为什么呢？这是很简单的道理，他可以赚到用不完的钱。

工程师们会更加专注于完成手头的任务，而竖发人担心的则是任务能否及时完成以及经费是否够用。这往往会将苦力和竖发人放置在对立面上。也许会有一些未知的因素会跑出来搅乱苦力们所提交上来的进程安排，但经理们往往却对此难以理解。经理们常用的台词是："我们必须想办法预测可能出现的未知问题，并防止它们发生。"他们这样说是完全认真的。对他们来讲，这就是怎么样从点A到

点B的问题。"而对于惯用逻辑思维的工程师们来讲，这句台词则会在他们的脑袋里面打坏几个齿轮，往往会使他们无言以对。

跳出自己的圈子来思考问题不是一件坏事。如果工程师在经过了以上这句台词的打击之后，还能够将他的脑袋装回到原位，并将其当作一个需要认真对待的问题来看待的话，那么竖发人就会对自己发明出来的这句台词感到惊讶。从逻辑上讲，我们确实不能预测我们不知道的问题，然而，我们也许可以想出一个办法去发现一些我们以前不知道的问题，并防止它们的发生。这才是那段"怒发冲冠的训话"的真正含义。

当两个工程师在谈话的时候，你会发现旁边的竖发人往往会眼睛呆滞无神，就好像你们是在说着一种他不懂的语言一样。为了使他感兴趣，请多使用"计划"、"预算"之类的词语。经理们喜欢说绝对的数字，例如这个将在某某时间完成，那个要花费多少多少等等。而工程师们则喜欢增加一点保险系数。因为他们看到过太多失败的实验，以致他们不相信第一次就能够成功。

依我的经验，如果你告诉竖发人费用在10到15美元，那么他听到的就只有10美元。因此，如果你不清楚自己能否做到那个低价，那就最好别说。无论他平常怎么样要你别往数字中掺水分，这一点你却一定要坚持。如果你有一定的信心，那么就请告诉他你可能达到的最低价格——做出准确的报价与计划也是一个好工程师的标志，虽然这可能需要多花一点功夫。不过请注意——不要往数字里掺太多的水分，以至于经理嫌太贵了因而使你做不成任何东西。你要记住，开展一项业务的目的就是为了赚钱，除非你能够做出东西并且卖掉，否则你就不能做那项业务。

3. 相互理解

如果工程师能够努力不用那些缩略语，而经理能够尽力解释其决策后面的一些原因，那么二者之间就能够达成很好的相互理解。你最需要的就是相互理解的愿望。在稍后我们还将对此种技能进行介绍。

7.2.2 想象

几年以前，我观看了对篮球运动员迈克尔·乔丹（Michael Jordan）的一次访谈节目，当时我就意识到我们之间有一些共同点。这既不是说我们两个都能够跳40in(1in=25.4mm)的高度，也不是说我们都会扣球入篮，而是多年以来我一直在使用的一个通向成功的方法，"魔术师"迈克尔也在用。这个方法就是想象（visualization）。

每个靠上班谋生的人都会经历困难与紧张的场面。这有可能是为了应付一个爱发火的老板、一个懒惰的员工，或者是一个不理智的同僚。你是否有过这样的经历，当你刚从一个为自己辩护的困难场合出来之后，你忽然就想起了"我本来

应该这样这样说的，或者应该那样那样说的。”你或许会自言自语：“后见之明总是完美的。”我这里想要告诉你的，是如何把这种后见之明转变成先见之明。

我还记得第一次与一个CEO谈话的场面。当时我只是一个低年级的工程系学生，而对方却是一个7亿美元的公司的老板。他问了几个我毫无准备的问题。我至今还记得当时自己头脑感到一片空白的情景。事后当我再次考虑那些问题时，我却清楚地知道自己当时应该怎么回答。从此以后，我下定决心，往后再也不能毫无准备地去应付那种场面了。不过，对于这种事情，我们到底应该怎样去准备呢？以下就是我后来所采用的办法。

从此开始，对于自己将要参加的这类场合，我会事先想象其中可能出现的各种场面。我会想象对话会如何进行。他说“这个”，我对“那个”。在我想象的场景中，我会试用不同的线路，然后为其想象一个应对的策略。我会想象那个人就在我面前，想象我们讨论某个事情，想象他理解我的观点，想象他理解我想采用的某一个方案。我发现当我这样做以后，当真正的会面进行的时候，实际情况竟然是如此的接近我的想象，因此我总知道我该说什么。更妙的是，我通常总能够从中得到我想要的东西。

你也许会认为我在撒谎，但我确实是利用这个技术来想象自己得到加薪和提升的，并且我可以诚实地告诉你，几乎每一次我都达到了自己的要求。当我回首往事的时候，这真的使我很吃惊。当我还是一个学生的时候，我就被提升到了工程师的职位。我现在同好几个人一起工作，其中还包括我以前的一个老板，我们是作为同事一起工作的，不过现在我的地位甚至还比他略高一点。作为一个来自犹他州的乡下人，我自然容易害羞，不习惯与人对视，我几乎不敢相信眼前发生的这一切会是真的。

如何去施行这种技术并没有固定的条文，不过你实践得越经常，你利用这一技术的成功率就越高。如果你想象1000遍进球的过程，那么下次当你不得不投进关键一球的时候，你就能够投进！这种技术对“魔术师”迈克尔有效，对我也有效。你应当试一试。

7.2.3　自我暗示

我最喜欢的一期SNL（Saturday Night Live，美国脱口秀节目），就是Stuart Smalley说“我够好，我够机灵，所有的人都喜欢我！”的那一期。这一期节目对类似想象的一种技术进行了嘲讽，这个技术就是自我暗示（affirmation）。

如果你接触过量子力学，就知道其中有一条原理是海森堡（Heisenberg）测不准原理。这个原理的目的是为了对一些有趣的实验结果进行解释而提出来的。在

这些实验中，量子（每天看到的光就是量子的一种）在有的实验中表现出了波的性质，而在另一些实验中则表现出了粒子的性质。但问题是，它们不应该同时表现出两种状态，因为这两种行为是相互排斥的。测不准原理的基本结论是，当你在量子水平上测量一个数据时，测量行为本身会影响测量的结果。你，作为一个观测者，基本上总可以得到你所希望的结果。

请再忍受片刻的跑题，容我把这种非工程的形而上学的观点讲完。如果你得到了你所寻找的，那么你寻找的这个动作，是否对你所得的这个结果有影响呢？这就是自我暗示要回答的问题。它告诉你，你能！自我暗示跟前面介绍的想象很相似，但是它进入了一个更高的境界。你不仅要想象在一个特定的场景中你将说什么或做什么，你还要想象你所需要的结果。

我知道这有点像是自我欺骗，我也承认它可以变成自我欺骗，它并不是一个完美的方法，但我确实相信它能够起作用。选取任何你想实现的目标，每天写它20遍，譬如“我将出版一本书”，或“我将得到提升”等等。坚持6个月看看有什么发生。我的经验是它确实起作用。你在读我的书，是不是？猜一猜我是如何开始动笔的吧[①]。

当你自我暗示时，有一件事情是确定无疑地会发生的，那就是你的脑袋会花上可观的时间考虑你正在寻找的东西。我相信，正是它，将引导着你去辨别那些到达你面前的机会，并使你对这些机会采取行动。几年以前，我在我的长期计划清单上列出了要写一本书的目标。我对这个目标进行了相当频繁的自我暗示。我对它想了很多。有一次在读一份电子学杂志时，我在封底看到了一个征求作者的广告。我填了份回单，于是他们要求我把自己写的文章寄去一份。因此我就坐了下来，开始写我的第一篇专栏文章。他们接受了，因此我就继续写。一个机会引向另一个机会，现在我终于实现了我以前设立的这个目标。想象一下，如果我当初没有把这个目标放在心中，那么当我看到前面所说的广告的时候会怎么样呢？所有的这一切会发生吗？我认为不会的。

“你得到你所寻找的”，这一法则控制着你的命运。请对自己说：“我够好，我够机灵，（这里插入你的希望），所有的人都喜欢我！”这种方法对Stuart起作用，对我也起作用，我相信它对你也会起作用。

7.2.4 打破自己的“壳”

这里介绍的技术对于帮助那些天生害羞的人打破他们的“壳”很有效果。你

① 我认为，想象和自我暗示跟宗教中的祈祷与信念十分接近，这并不是巧合。我认为它们是同样起作用的基本原理。

若能够克服在工程师中十分常见的自然害羞的性格，学习一点了解周围人的方法，那么这将在你的职业生涯中增加好多的机会，这些机会靠其他的途径是不可能得到的。

要想打破自己的"壳"，最困难的事情是如何跨出第一步。你必须跨出第一步。走出第一步以后，就会一步更比一步容易。例如，你必须把那个你实在不想打的电话给打了。你已经花了很多的时间对它进行想象，你已经对所有可能发生的事情进行了考虑。但你现在过不了一个坎——你就是不想打这个电话。在这种时候感到忧惧并不是什么反常的事情，不过不要放弃希望，还是有办法可以突破这一关的。

首先，请清理你的头脑，停止考虑将要发生什么样的事情，而要把思想集中在一件事情上，即把电话拿起来。一旦电话已在你的耳边，则只考虑拨号的事情，不要考虑别的。当有某个人应答的时候，则只考虑如何开始对话。一旦开始，那么你以前所做的想象准备就将切入，接下来的事情将很容易进行下去。

7.2.5　反复练习

这些技术决不是只需要学习一次就可以弃之不管的东西。事实上，每经过一次具体的应用，这些技术的使用就会变得更加容易。它们需要反复练习，大量练习，跟学习一样乐器或学一门外语没什么两样。你用得越多，你对它就越精通。找出那些对你最起作用的方法，多加练习。

目前我仍然会遇到一些情况，需要使用这些对我来讲已有20余年的老技术。它们仍然起作用，并且我还在不断发现使用它们的新方法。是的，当需要跟CEO谈话时，我仍然会紧张不安，但现在要比以前进行得流畅多了。

经验法则

- 对工程师来讲，许多管理层的决策是没道理的（除非他们了解决策背后的原因）。
- 经理们在理解技术性的对话上有困难。
- 把事情讲开来，直到彼此理解为止。
- 想象场景，想象将发生什么，你该说什么。
- 每天把你的目标写20遍。
- 每次一步，打破你的"壳"。
- 练习造就完美，要实践这些技能到永远。

7.3 交流技巧

工程师们最被人诟病的一点就是缺乏交流技巧。我曾经被问到，为什么整天和非真即假、非假即真的逻辑打交道的工程师们，却很难对简单的“是”或者“不是”作出爽快的回答。

有时我自己也为此感到苦恼。给你一个特定的问题，譬如“某某项目将需要很长的时间吗？”我的答案往往会这样开始：“这取决于……。”如果我不从这一点开始小心地回答的话，那么听我说话的人很快就会变得眼神发呆，抓不住我的要领。

如果你是一个好的沟通者，你就会更加成功。简单讲就是，如今的世界上我们所做的任何事情都离不开交流。毫无疑问，像因特网这类能够使人们更好地进行交流的工具，大都是工程师们发明出来的，关于这类工具本身的介绍，就足以开办一门课程。因此以下我只能介绍一些要点。

7.3.1 口语

日常交流的主要形式是口语。这也是工程师们最难处理好的一种交流方式（我认为这跟我们前面谈到的害羞有关）。然而，它却是我们所拥有的最重要的交流技能。沟通的目标是对方理解你的意思，同时你也理解对方的意思，面对面的口头交流是达到这个目标的最佳途径。

1. 观察身体语言

有人说，在人们用口语对话进行交流的时候，有高达90%的内容其实根本就不是用口语来完成的。关于这个话题，如果你真想深入下去的话，你可以找到整本整本的书籍，它们会教你各种各样的体态代表什么意思，譬如眼睛左顾、右盼、上看、下看，等等。不过，在大多数时候，我相信只要你用心注意，你就能够从一个人的衣着打扮以及他的言谈举止得到很多的信息。从很小的时候开始，其实你就一直在做着这种事情，只要你试一下，你就会发现这种本领来得很自然。有太多的时候，我们由于太过匆促或分心，因而错过了一些简单的信号。例如，当一个人已经退到他的底线时，他会显得很不舒服。如果你没有注意到因而继续穷追猛打的话，那稍后你很可能会得到一个不愉快的结局。

2. 考虑谈话对象

在交谈中，你应该考虑到谈话对象的背景。不要试图在一个拥有MBA学位的CEO面前去解释量子理论的细节。你应该对你要交流的内容进行提炼，形成一些你的谈话对象会在意的要点。不过有一点要注意——请不要将跟你谈话的人当成笨蛋！你可以提炼信息，但不要说得过于简单。如果你能够将这一点把握得恰到

好处的话，那么你也许会惊奇你的老板居然能够理解那么多问题，尤其是在他们读了本书之后！

如果你交谈的对象来自不同的文化背景甚至于跟你的母语都不一样，那么你应该简化用词，确保他能够听懂你。不要使用他们可能不知道的词汇，那样的话，你就不知道他们是否真正明白你所指的是什么。尤其不要使用那些只在你们的公司文化中具有意义的单词。每个人都是靠感觉来感受这个世界的，而每个人的感觉又都是建立在自己的文化背景基础之上的。你无需大声说话。这不会有什么帮助。不过要尽量做到吐字清楚。如果你也像我一样来自乡村，那么你可能也会带有很浓重的乡音，用带有乡音的声调说话有可能给你带来交流上的问题。

3. 关于发怒

有时发怒是正确的反应。在有的时候，只有发怒才能使你的谈话对手明白你所要交流的内容的严重性。你也许没有其他更好的办法来让对方认可你的立场。然而，发怒应该比较少用。用得越少，用一次的分量就越重。如果你是一个见到出错就发怒的人，那么发怒就起不到什么作用。

4. 印证式倾听

提高口头交流能力的一个重要方法就是使用印证式倾听（reflective listening）技术。这种交流技巧背后的原理，就是要通过向说话的人复述他所说过的话，来达到加深理解的目的。不过要小心的是，不要引起人家的反感。没有人喜欢瞎模仿自己的人。其窍门在于要基于你的理解来进行重新表述，并看对方是否认可你的理解。这种技术对于来自于不同文化背景的人之间的交流尤其有用，例如，一个搞工程的人同一个搞管理的人之间的交流。

5. 阅读

我认为提高口语能力的唯一最好方法就是阅读。当你阅读的时候，你就体验着别人是如何交流的。从侦探小说到调查报告，这种方法都有效果——你读得越多，你同别人交流的能力就越强。你将增加词汇，你将理解不同文化的差异，你也将能够更好地组织你的思想，以使别人更容易理解。

7.3.2　写作

无论是电子邮件、报告，还是十分正式的文件，总之写作能力在工程领域中是极其重要的。细想起来，我所接触过的每一个工程师都会牵涉到这样或那样的跟写作有关的问题。我认为这是一项很容易被人们忽视的技能。

1. 校对

首先，同口头交流相比，写作有一个明显的优点，就是在你打印、发送、张

贴或出版之前，你可以从头进行检查。你应该对自己所写的任何交流材料进行校对。只存在校对多少遍的问题。如果写的材料很短，并且是需要你进行口头传达的，那么快速的一瞥就够了。相反，如果是要给一个高层读的，或者是要给某个有理由将它撕碎的人读的，那么要请你多校对几遍。

在校对写作时，我认为最基本的一个技能就是要大声地读出声来，看看它是否流畅好听。不要忘记在逗号处停顿一下，在句号处停止片刻，就像学校里所教的那样。这个技术可以让你发现那些发音古怪的地方并予以修改。

如果你特别在意，那么就到某个人的面前去读，看他能否理解你写的材料。应保证试听的这个人跟最终接收文件的人具有相似的背景。

2. 适当地使用强调

在写作交流中，你既不能利用声音的抑扬顿挫，也不能把肢体语言捆绑在你的文字上。不过，我们可以通过采用不同字体、加粗、着重号以及其他许多可以表示强调的形式来弥补这种不足。如果你给文字加上着重号，那表示你想大叫或想提高声音。加粗的文字可以强调重要性，楷体可以帮助你把注意力引向某处。

现在已经出现了大量表示眨眼睛、微笑及其他动作或情绪的标点交流符号。不过，我相信大多数人只学会了微笑的表示符号，其余的符号则只有极少数人知道。

注意我说的是要适当地使用强调。这种技术使用起来容易失控。不要让着重号坏了你的事。着重号用多了就失去了意义，太多的加粗文字不会干好事，不同的字体用多了别人会以为你是个疯子。窍门是要会熟练使用这些技术。

3. 在写作中使用口头交流技巧

利用前面谈到的一些口头交流技巧，将可以极大地提高你的写作技能。像“考虑你的说话对象”、“印证式倾听”（在写作的场合就是读/写）等技术，就可以帮助你理解对方及让对方理解你。

4. 电子邮件注意

要提防“冒火”的邮件。在电子邮件的王国里，很容易产生误解，其中人们的反应不如在正常的人与人之间的接触中那么老练。如果你看到起了战火，我认为最好的方法就是找对方当面谈谈。

要注意邮件的抄送列表。小心转发邮件。时刻记住你的邮件内容可以很容易地被转发给你所不希望看到的人。

7.3.3 切中要害

写作和口头交流有一些共同特点。其中有一点就是切中要害很重要。要用自

己需要的东西来建立理解，但是不要用过了头。如果10个词语够了，就不要用100个。下面是其他一些可以切中要害的方法。

1. 打比方

在交流中最有力的一个工具就是打比方。在解释问题、概念和理论时，这个方法十分有效。打比方有助于接收信息的一方把正在谈论的事物形象化。例如，打比方可以帮助一个人理解话题的细节，就像望远镜可以帮助你看清月亮（或邻居家）的细节一样。

你看，我刚刚打了一个比方，用其来解释打比方。这也许有点幽默。打比方是一种将新的思想和现有的东西做比较的技术。它很有效。

2. 画草图

大家都听说过一幅图片胜过千言万语。工程师们尤其明白这一点，他们用原理图来表达思想。原理图就是一种简单的图形。然而，在电子邮件的世界里，我们却常常忽略了我们掌握得如此好的一样技术。我们往往会花上好几段文字去解释一个事物，而如果用草图的话，也许一个草图就可以了。请给自己配置一台扫描仪，这样你就可以发送带有草图的电子邮件了。

3. 注意企业文化词汇

每一块地方聚集的人群都会形成一些自己的词汇，以加快内部的交流。在企业内部，有些日常词汇可能会代表完全不同的意义。当你与公司外部的人打交道时，如果你使用了公司内部的词汇，请给他们解释一下那些词汇的意义。

经验法则

- 注意身体语言。
- 考虑你谈话的对象是谁。
- 发怒有时是恰当的，但不要常用。
- 印证式地倾听。
- 多阅读。
- 校对。
- 适当地使用强调。
- 打比方。
- 画草图。
- 要给公司外的人解释本公司的文化词汇。

7.4 给经理的寄语

在我职业生涯的早期，我对管理层形成了一种偏见，在很多年以前的一次烦人的会议上，我将这种观点归纳成一了句话，写在了自己的日程备忘录上："管理层是无用的魔鬼。"一些年以后，我自己也带上了"竖发"[①]，成了管理者，我因此发现了管理者存在的几个理由（它们有可能是好的或真正的理由，也有可能仅仅是为了给我自己置身于管理层找一个借口。到底是哪种情况，你可以自己作出判断）。

7.4.1 做服务者

服务就是让事情变得容易或更加容易。管理者应该是一个服务者，你应该为工程师们创造一个赖以成功的环境。你应该为工程师们的成功带来必要的工具。你应该帮助工程师们把他们喜欢使用的技术略语翻译给你的上司们（或者购买本书送给他们，看看能否有点帮助）。大多数工程师只喜欢做设计而不愿意负责或管理什么事情。他们喜欢把这类事情留给你。

7.4.2 做缓冲者

最好的经理应该是一个缓冲器，他会在上层的古怪行为（比如提出时限不合理的矛盾要求等）与底下的真实世界（如实际的计划与需求等）之间起缓冲作用。他会从竖发们的混乱决策中为工程师们的世界带来一些秩序。这些是工程师们的成功所必需的。不要忘记，在工程师的世界里，如果一切都合乎道理的话，那将对他们大有帮助。

7.4.3 做激励者

好的经理应该理解他的雇员，是他们的激励者。如果一个雇员总得自己乞求加薪，那么他将很快离开你而去别的地方。如果他是一个"设计"能手甚或只是个平凡之辈，你也会发现，给他们一个合理的提薪以示嘉奖，也要比雇用和训练一个新手来得便宜。激励雇员的好处还不止于此，它对于公司的自身利益也一样重要。我唾弃经理们用长篇大论的表扬和鼓励来赢取雇员们的高兴、以代替加薪的做法。是的，口头的表扬和鼓励很好，但这只有在基本的需求（如食物、住房等）得到满足的前提下才有用处。如果你给人家的工资太低的话，那么没有什么奖励能够让员工留在你的周围。

① 对Dilbert®短剧的一个引用，不过这里不是指一个卡通形象，而是指一个任命文件。

7.4.4　要理解工程师们

管理者并不是为了理解工程师们而存在的，但这却是一个经验，它可以帮助你成为一个好的经理。作为一个管理者，你应该了解工程师们的以下特点。

1. 工程师们需要含糊空间

工程师们需要一点含糊空间。你是否曾问过一个工程师他对他的答案是否100%地有信心？如果你问过的话，我敢打赌，你一定很失望。要想让一个工程师对一件事情100%地有信心是不可能的。在工程领域中，你不知道、也不可能知道所有的事物。这个事实会不断地冲击你。你每天都会发现新的出错的途径，你需要连续不断地去修补，防止错误发生。如果工程师给你一个范围，请将其中较保守的那个数字作为你的估计。要给他一点含糊空间。对他太过用力压制的话，很可能会引火烧身。

2. 工程师们是永远的乐观者

我还没有遇到过一个工程师，他不会低估他完成某件事情所需的时间。这是一个简单的事实——好的工程师在本质上都是乐观者，真正了不起的工程师则会拼命地强迫自己努力工作，以使自己安排好的乐观计划能如期完成。我听到过一个写软件的经验法则，就是：实际需要的时间往往是工程师们估计时间的三倍。我发现它确实成立。

3. 工程师们渴望成长

你对电气工程师的观点了解越多，你对他们的管理就会越成功。如果你能够把这个技巧应用得更上一层楼的话，你就可以帮助你的工程师们增长能力，能够承担更多的工作，也就是可以将平凡之辈变成“射击”能手，甚至于可以拯救一些无用之徒①。大多数的工程师都渴望成长，渴望在他们的工作上变得更好，不过他们需要鼓励，需要机会，需要一点点对失败的缓冲。

7.4.5　最好的经理在多数时候都是对的

在我得出“管理层是无用的魔鬼”这个结论之后的某个时候（具体应该是在我自己也介入到了管理层，并发现了生活中的一些目的之后），我得出了描述好经理的一个公式。记住一个经理把他几乎所有的时间都用在了做决策上，他需要决定该买什么样的工具，该雇什么样的人，针对一个具体问题该做些什么，午餐该吃什么等等。他有多好就取决于他有多正确。如果他正确的时候比不正确的时候

① 如果你不明白“射击”能手、平凡之辈、无用之徒的含义，那你一定是跳过了几页，或者是有记忆上的问题。

要多，公司就会赚到钱。如果他错得太多，公司的业绩就会急转直下，也就无需他再费周折了。

一个好经理在51%的时间里是正确的，一个了不起的经理在70%、80%，甚至在90%的时间里都是正确的。如果你的决策在大多数时间里都是正确的，那么你必会成功。

当你需要作出决策时，请记住这一点：你无需永远正确。不要优柔寡断，不要让太多的顾虑阻止你作出抉择。通常优柔寡断本身就足以导致你失败。根据情况，采取行动，并观察结果。如果你决策错了，请不要害怕承认自己错了。要从错误中吸取教训，避免重犯。

7.4.6 在平凡之辈中找出"射击"能手

一个经理需要做的最富有挑战性的一件事情，就是要在耗费了个把小时的时间之后，判断一个人能否成为一个好雇员并且聘用他。如前所述，你真的需要让你的团队里充满"射击"能手，然而如何才能发现他们呢？你如何才能够避免摊上无能之徒，避免你的团队带病上路呢？尽管没有完美的方法，但在了解一个工程师时，还是有一些要领可供利用。

1. 穿着

不要太看重一个人的穿着。在我工作的地方，穿着随便是很正常的，除非一个人有严重的卫生问题，否则我都不会在这方面扣他的分。不过，倒是有一次有个应聘者询问我们的着装有什么规定。他的考虑给了我很深刻的印象。然而，它没什么影响。我们公司感兴趣的是结果和产品，这两样东西都不会受到开发人员着装的明显影响①。

2. 基本知识

作为经理，我对这一点特别看重。有一些技能不应该由我来教你，你来应聘这个职位就应该自己具备。尽管有一个学位或某种学历会比较有利，但我不会将其看成是进门必穿的鞋子。我已经见过太多的大学毕业生是以"考完就扔"的方法取得学分的。他们以高分通过了所有的考试，但却没有注意保存这些知识。我采用类似下面的问题来筛除这种类型的人（如图7-1所示）。

你可能会对此发笑，不过我要告诉你，紧邻我们有一所重要大学，它被认为是一所很好的工科院校，我就经常用这个问题来面试那些刚从这个学校毕业的学生。我看到有一半多的应聘者会答错这个问题。基础很重要。如果你没有基础，

① 这并不全对。我发现维持一个随意的环境反而更加有利于提高团队的效率，不过这是在聘用以后才会牵涉到的事情，因此并不能算数。

那你做设计就只能是猜。更糟糕的情况是，你自以为知道其实却不知道。经过本书开头部分对基础的巩固，我希望你应该已经理解这一点的重要性。我宁愿聘用一个基础扎实，平均只有2.9分的人，而不愿要一个平均4.0分，但却会在基础上栽跟斗的人。

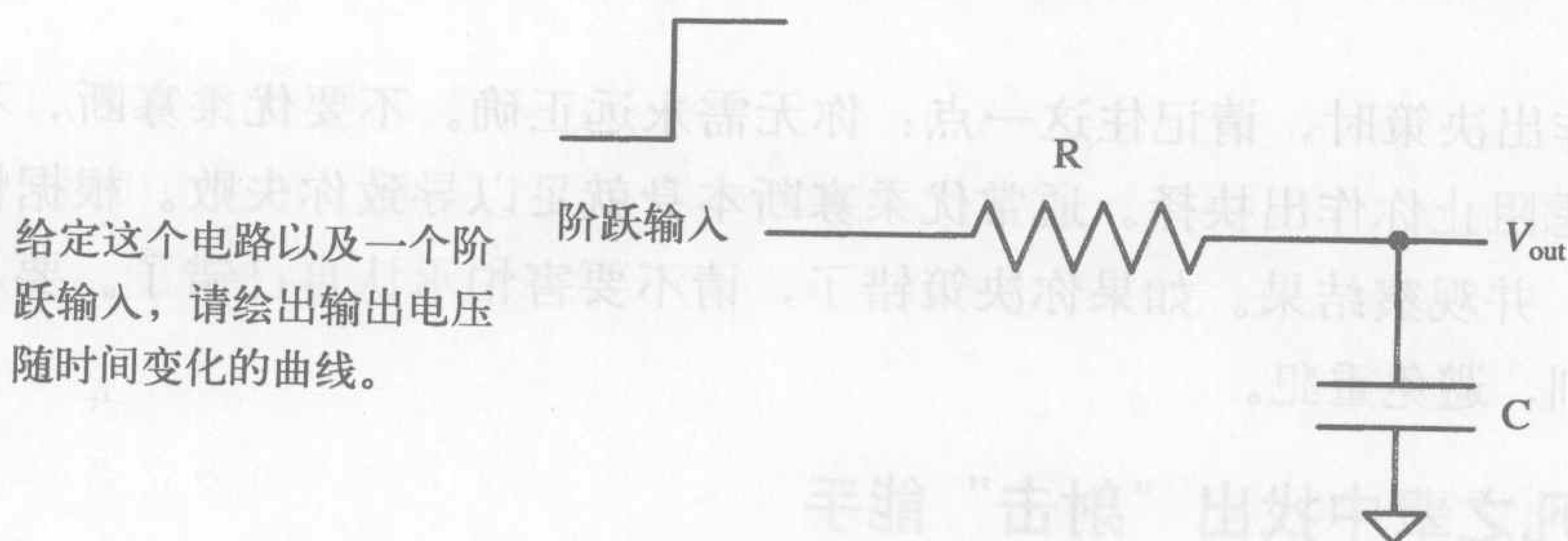


图7-1 标准电气工程师的面试题

3. 学习能力

我还没有见过一个员工在参与一项新的工作时不需要学习的。有时在面试中，我会故意教面试者一些新知识，然后在面试中再转到相关的主题，看他能否把我教过的知识捡起来。快速学习和牢固掌握的能力对于一个工程团队的成功来讲是很重要的。技术的更新很快就会将那些缺乏学习能力的人扫地出门。

4. 求知欲

你也许会认为这同上面的内容重复了，但我认为它是单独的一个内容。我常常会问面试者一个我确信他们不知道答案的问题，目的就是想看看他们的反应。他们是尽力将问题应付过去呢？还是承认他们不知道并寻求帮助？在如今设计周期越来越短的情况下，你没有时间玩游戏。这就是说，“我不知道，但我将找到答案”是一个适当的答案。你也可以将这方面的测试内容放在较后面进行。你可以回拨面试者的电话，再问一次在面试中曾经绊倒过他的一个问题，看他是不是很感兴趣并已经找出了答案。

5. 人际技巧

在哪里能找到一个无需跟其他人打交道的工作吗？我很怀疑。一个好的工程团队其内部应该相处融洽，这就是我很看重人际技巧的原因。你如何处理压力？你能够跟自己不关心的人融洽相处吗？这是在面试中相当困难然而却不得不进行的评估。我会邀请我的领导来给应聘者提问，观察他如何对压力作出反应。

6. 态度/动力

积极的态度总会给我留下深刻的印象。在这里我引用一下我父亲爱说的一句

话："婴儿不会懒[1]到不喝奶的地步。"应该坚信总可以做点什么，我认为这种态度重要。要寻找面试者试图放弃问题的迹象。他是个有毅力的候选人吗？他在面试过程中不停地抱怨吗？他对他的最后一份工作有怨言吗？所有这些类型我都见过。我不会聘用喜欢哭诉的人。

7. 常识

这都跟尽快完成工作有关。有太多的时候，一个可以说是很机灵的人，却不会应用他所学过的知识。如果一个人没有常识，那他在应用其拥有的知识时就将遇到很大的困难。下面就是我常用来判断一个人的常识水平的一道脑力难题：

> 你站在一个房子里，有两根绳子从高高的天花板上垂下来。如果你抓住其中一根，走到另外一根的下面，这第二跟绳子还要几英尺才能够得到（因为它是垂直掉下来的）。你的任务是要把两根绳子系在一起。你只有三个工具来完成这个任务：一盒火柴、两块分开的方手纸，和一个螺丝刀。你如何能将绳子系在一起呢？[2]

8. 总结

你需要找一个可以在脑袋里面解微分方程的人吗？我认为不需要。我们可以购买MathCad®来做这个工作。你应该去了解候选人是否拥有基础知识，是否能够并且愿意学习其余的知识。

记住，了不起的经理很少，普普通通的经理却到处都是。公司的成功并不取决于你是否是一个了不起的经理。然而，难道我们因此就应该满足于做一个普通的经理吗？对于任何公司来讲，了不起的经理都是一笔巨大的财富。了不起的经理可以将平凡之辈转变成"射击"能手，可以使许多难以置信的事情发生。

成为一个了不起的经理并非我们想象的那么难。听、看、再听，直到在大多数时候你都正确为止。这样，你就不再是"无用的魔鬼"了。

经验法则

- 管理层是"无用的魔鬼"吗？
- 做一个服务者。
- 做一个缓冲者。

---

① 懒也能够变成一种财富吗？如果它可以激发创造性的话，它就能够。如果你把最难的工作交给最懒的人，他就会找最容易的方法去完成它。所以如果这有点道理的话，我猜想你也许可以去找非常积极的"懒人"。

② 我不知道我是否需要揭开答案。如果本书卖得好的话，将来面试我该用什么题目呢？我提示一下，答案跟单摆和螺丝刀有关。精明但缺乏常识的人会考虑得太多（你不会相信我听到过的一些答案）。如果你拥有很高的常识量，你会在数秒之内得到答案并惊奇答案为什么这样简单。

- 做一个激励者。
- 理解你的工程师们。
- 做到大多数时候都正确。
- 聘用“射击”能手。
- 不要做无用的人。
- 不要做魔鬼。

7.5 给雇员的寄语

作为一个雇员，你的动力将跟你为之工作的“竖发”老板的动力一样，最终都会归结为金钱。你需要一个工作并得到报酬。工作满意当然很重要，但与需要买食物来吃，需要有一块干地方睡觉相比，那只是第二位的。这就意味着一个雇员需要了解两件事情——如何得到一份工作，以及如何保持一份工作。以下为此提供一些指导原则。

7.5.1 如何得到一份工作

一切从面试开始。我面试过的工程师实在太多，已经没法记清。我从这些真实的面试中，归纳提炼出了7条原则，我称之为“7不要”①。无论你讥笑也罢，大笑也罢，傻笑也罢，但请你不要在下次面试的时候也犯类似的错误。在下面这些段落中出现的人物都是专业人士。

1. 不要高傲

要当心给潜在雇主留下的印象。我曾经面试过的一个应聘者，他好像真是带着高傲的态度来找工作的。他表现得就好像是：若他真的必须为我们工作的话，他就将为我们工作，但是他实在是不喜欢这个工作。在他身上，“你没有任何知识可以教我”的心态表现得十分强烈。一个接受面试的工程师，居然认为我们知道的知识少得可怜，我当时真的是感到特别难受。尤其是当要求他画一个简单的电路原理图时，他说“这个原理图人人都会”，然后摆了一下手，什么也没有写下，这特别令我们不悦。我马上认为他实际上根本不会，他的这一切只不过是一个表演，目的为的是掩饰其无知罢了。

2. 不要害怕说“我不会”

由于存在巨大的压力，面试场合也许是人们最不爱说“我不会”的地方，但

① 不要仅仅将它们当成是面试时才需要注意的原则，你也可以将这里的每一个案例当成是干任何工作时都可以应用的原则。

“我不会”实际上并不是一个很差的答案。尤其是当你在后面再加上一句“但我会找到它”的时候。我曾经对一个面试者产生了很好的印象，这个面试者在面试结束以后，专门发电子邮件给我，对面试的时候他回答不上的一个问题进行了解答。他这种查找答案的态度表明了其具有坚定的性格和求知的欲望。光是这一点就足以弥补其当前知识的不足。

3. 不要失掉冷静

我曾经面试过的一个人明显是被问到的一些问题弄乱了章法。不过真正令其失分的倒不是他答不上问题，而是他在试图解答问题的时候，猛然甩掉铅笔、不断地拍打桌面的那种烦乱的样子。我们的工作环境要比面试场合的压力大得多，我可不愿整天去担心某个人会出精神上的问题。

4. 不要轻易放弃

如果你不知道某个特定问题的答案，只要有可能的话，你也应该尽力去寻找它的答案。我经常会问一些候选人肯定不知道的问题，就是为了看他们是怎么处理的。那种看上一眼就走开的人永远不会给我留下印象。记住，当有的人站在那里说无法解决的时候，另外一些人可能已经开始在试着解决了。

5. 不要害怕问问题

除了上面谈到的要点之外，还要请你记住，没有人指望你什么都会。在面试中，若有面试者针对我分配给他们的问题或任务提出问题，这通常表示这个人在不懂的时候愿意去搞懂。在工程界这是一种很重要的品质。此外，也要利用面试的机会了解你将去工作的场所的一些信息。

6. 不要把头靠在桌上

你也许不信，但我可以证明在面试的时候我真的见到过这样的情况。在面试过程中，我见到过一个面试者有好几次将头靠在桌面上。我搞不清楚他到底是累了呢，还是因为桌面的振动声可以告诉他面试进展的好坏，所以他想倾听。当然，这不会成为我不聘用某个人的唯一原因（我的好些好主意就是在这种半睡半醒的状态下获得的）。然而，当他的这个问题还同其他更显眼的一些问题凑在一起的时候，我就不得不慎重选择了。大家猜得到，我最后的选择就是让他有大量的时间去打盹！

7. 不要说自己蠢

如果不是我亲眼看到，我不会相信真有这种事情。有一个应聘者被几个基础的问题弄得有点狼狈，但这并不是导致最终结果的主要原因。当他第一次说“天哪，我真傻”时，我没怎么在意。但随着面试的进行，我后来又听到了“哦，我是个白痴”、“我是如此的愚蠢”等等不下10次。到面试结束的时候，我确信的只

有一件事情，那就是我肯定不会聘用一个白痴，尤其是如此愚蠢的一个白痴。

7.5.2　最后一点考虑

关于如何得到面试的机会以及如何通过面试，你可以找到太多的指南。它们甚至比我这里的“7不要”更为经典。用功阅读一下这类知识会对你有好处的。我也认为，对你要去面试的公司做点了解肯定会有帮助。利用今天我们所拥有的各种便利条件，在互联网上找找相关的信息。这将帮助你确定自己想去的地方，此外，掌握一点对方的背景再去应聘也一定会对你有用。

7.5.3　如何保有一份工作

当斧子落下来的时候，你会成为被砍掉的一个吗？你如何才能增加自己在一个公司的稳定性呢？雇主是凭什么决定留下一个人而辞掉另外一个人的呢？在这个解雇成瘾的世界里，除了简单地做好你的工作以外，你还可以在下面的5个关键方面做点事情，来给自己增加一点安全感。

1. 价值

有一个法则就是，*公司是为了赚钱而存在的*。即使是非盈利的公司，它也需要有入账来支付工资和各种开销。当你的雇主开始审查你和你的同事的时候，你应该认识到这在他们的脑袋里是头等大事。

经理在这时必须要问自己一个问题，即如果我必须从只有一个雇员开始一切重来，那么应该是谁呢？或者说，谁最有可能使这个公司成功呢？在我的分析中，这个人是个“射击”能手。他工作努力，有很大的天分，并且会处理压力，能够很好地与其他人协调工作。无论你向他索要什么，你都能得到。你无需老是检查他的工作。你知道他肯定在他的位置。他对公司的收益有直接的影响。

因此，你必须记住，你的总价值是最重要的。不过要是你的价值在不断增加，但却没有人注意到，那该怎么办呢？这确有可能，尤其是在较大的公司。我的答案是：适当地自我夸耀一下不是什么坏事。有一个向自己及雇主进行自我展示的好办法，就是定期做自我评价。列出你上一年完成的工作，并与今年完成的工作对比。你有提高吗？在你有提高之前，请把清单留给自己。直到有提高了，再把清单交给老板。他会对你的这种上进的态度表示赞赏，这也是让他能够看到你为公司做了什么的一个好机会。

2. 职位

我要再重复一下上面讲过的法则，*公司是为了赚钱而存在的*。它们不做跟产品无关的事情。因此，你所能做的最重要的工作，就是那种直接跟产品有关的工

作。不要跟那种一次性的工作沾边。你也许会问，什么叫一次性的工作？一次性的工作就是这样一种工作，去掉它之后，产品仍然可以照卖不误。在公司里，除去将产品交付给客户的这个层次以外，就是一次性的工作层次。ISO9000“企业协调员”听起来也许是个很了不起的官衔，但当你把一切都搞定之后，公司就不再需要你了。如果你发现自己所做的是个一次性的工作，那么就是你该开始换工作的时候了。

3. 忠诚

抱怨是人的天性。因此，闲谈是人们很容易掉下去的一个很微妙的陷阱。在这种陷阱里，你跟别人讨论老板最近所受到的打击或所犯下的过失。我所遇到的每一个老板都很看重忠诚。如果你忍不住要去传播流言，那么不论其是真是假，你都已经把自己放在了一个很不稳固的位置。我不是说“竖发”们不会犯错误。事实上，如你所知，我认为经理只要保证在51%的时候正确就可以成功。因此请记住这样一点，他们可能有他们的过失，但你也一样有。如果你跟你的老板之间存在严重的分歧，你既无法忽视它，也无法将其埋在心底不讲出来，那么你最好早点开始找新工作吧。因为在今天的市场上，你很快就会找到的。

4. 努力

其重要性表现在两个方面。第一，勤能补拙。记住，一个每天都花数小时在实验室里笨手笨脚地修修补补的人，能够比一个整天都在上网的聪明工程师更快地完成他的工作。第二，如今大家所考虑的都是如何最快地将产品投放市场。这就是MAMA法则存在的全部原因。所有的“竖发”们所希望做的事情就是出货、卖掉，用一句话讲，就是要做生意。因此，你付出的巨大努力一般都会被老板们注意到。不过请记住，你同样应该避免卷入对老板过失的品评，因为这对你在老板眼中的印象有巨大的影响。你在老板的眼里可以是一个工作狂，也可以是一个懒鬼。选择权在你自己的手中。

5. 最坏的情况

有可能无论你做什么，你仍然会被解雇。有时公司必须深度裁员，没有其他的选择。我建议你将其看成是自己能够得到的最佳安置，以给自己留下一个良好的纪录。如果企业能够恢复元气，老板们都更加愿意聘用一个自己知道其能够干好工作的人，而不愿意随便在街上找一个平凡之辈。因此不要断了自己的后路。

7.5.4 最后一点慎重考虑

无论怎样看，我上面列出的这个清单都是不全面的，肯定还可以往上面添加更多的内容。当一个雇主在做出这种艰难决定的时候，人际技巧、态度以及其他

的因素都会得到考虑。但也有雪上加霜的时候，因为世界并不总是香甜的。有一些虐待狂式的“竖发”会给被解雇的人们加一个恶名（我希望这种情况是例外，而不是惯例）。如果你遇到这种老板，不要抱怨，赶紧去找新工作。

记住，与人打交道不是一门精确的科学。在公司文化中没有欧姆定律。不过我上面列出的内容，通常都是起作用的。你也可以参照我前面介绍过的各种员工类型——“射击”能手、平凡之辈以及无用之辈等等，对我所列出的内容作进一步的总结。这就是，当遇到裁员的时候，你不应该是无用之辈，如果想要有所帮助的话，就应该做“射击”能手。

经验法则

- 避免面试中的“7不要”。
- 公司是为了赚钱而存在的。
- 公司是为了赚钱而存在的（重复一次以示重要）。
- 保住职位要关注5个关键的方面。
- 与人打交道不是精确的科学。
- 不要做无用之辈。
- 要做“射击”能手。

7.6 如何制造一个伟大的产品

懒人弹簧（Slinky）玩具、Lego牌积木玩具、PC机、硅胶泥蛋（Silly Putty）玩具、吃草机、维可牢（Velcro）尼龙搭扣、手机、DVD、宠物机器人、微波炉等等，这类杀手级的产品似乎永远都数不完。我们如何才能设计出一个这样的伟大产品呢？什么因素能够促成一个产品的成功呢？请相信我，那种烂在人们脑袋里的好主意的清单，要比真正实现了产品化的清单长得多。对于那些具有事业心的员工，我这里有一些点子，供你们想制造伟大产品的时候参考。

1. 想法

通常，一个伟大产品的核心在于需求。越多的人有相同的需求，一个点子成功的可能就越大。这里我讲一个真实的生活例子。在犹他州的罗根，冬天里我的车窗玻璃总是结霜的。我没有耐心早早启动汽车，等待除霜器清洁车窗玻璃，因此我自己把霜刮掉。刮霜一点也不好玩，因此去年我有了一个很好的想法，就是要发明一样东西。为什么不在挡风玻璃洗液中放一个加热器，这样我不就有了一个快速的除霜车窗而无需再刮霜了吗？我相信有很多像我一样的人会喜欢这个产品。

让我们对这个主意评估一下：首先你要有辆车。这就把产品的主要市场限制在了加拿大、美国和欧洲。其次，你居住的地方必须足够寒冷，会使你的车窗结霜。这样一来，美国就少了一半。再下来，必须要像我这样，负担不起在车库里停车的费用。这又减掉了一大批人。我猜想加拿大人喜欢亲手刮霜，因此又失去了一大块市场。那么这个主意能让我成为百万富翁吗？也许不能。不过如果我努力去做的话，也许在一段时间里可以产生一份像样的收入。

我们把它与除草机（weed eater）的市场做个比较（也许称除草机为动弦剪草机（string trimmer）可能更为恰当）。当George C. Ballas将一些细绳的一端粘结在一个旧的马口铁罐头盒上并让罐头盒跟着他的电钻一起旋转的时候，他所提出的那种需求也正是许多男人所需要的。它不仅要剪草，它还牵涉到一个电机和动力的传动！

他的市场是任何一个梦想有一种容易的方法来剪草坪的人。此外，它还迎合了男人爱偷懒的一面。我想它成功的可能性应该比我的除霜创意要大得多，你说是不是？注意我这里说的是可能性。要使一个产品成功还需要很多其他的因素。

2. 设计

产品必须能够很好地工作。这意味着你的设计必须按照用户期望的样子起作用。如果人人都把产品往回送，你的成功就不会长久。只有一个显而易见的例外，那就是软件！在仅此一家别无分店的时候，有时人们会愿意忍受很扎眼的产品问题（即所谓的GPF，Glaring Product Fault）。这往往是由于你实在需要某个特殊功能，因此愿意忍受其中的漏洞。这真的很令人恼火，但是你不能退货，因为你已经点击了最终用户许可协议（EULA）上的“我同意”。这种最终用户许可协议也许会长达40页，也许没有人真正去看它，但就是在它的里面，剥夺了用户一切诉诸法律的权利，更不用说退货了。尽管这很霸道，但由于我喜欢其特色，因此我现在正在用着一款流行的字处理软件[①]。

同时，你的产品还必须样子好看。自从20世纪50年代以来，工业设计者们已经让消费者相信，产品不仅可以做到功能好，外观也可以做得很漂亮。确实可以找出一些很丑但却很成功的产品，但如果它们能够好看一点的话，它们应该可以更加成功。你是否曾用“她真是小巧可爱”来形容过女性以外的某件事物呢？[②]

---

① 软件的稳定性正在提高，但不同于任何其他类型的消费品，它仍然不对其可能引起的任何损害负责。我所能说的只能是，能够想出EULA这个主意、让其既长又刻板无味的那个人，真是特别精明和幸运得要死。

② 这也许是一个很不恰当的比方，不过我曾听到过一个工程师用其来形容一个IC封装。希望你不要想歪了！

3. 时机

时机在发布产品过程中的重要性，就跟开玩笑要讲时机是一样的。我就不相信在美国人移居到郊区并开始同草坪开战之前，吃草机能够卖得出去。如果懒人弹簧玩具发明在任天堂之后，它在市面上就走不远。我曾工作过的一个公司的一个点子改变过我们的市场。该点子是为人们提供30余个不同的新闻频道，它曾经取得过巨大的成功。然而，它的前两次尝试都没能坚持下来、均以彻底失败告终，直到第三次尝试才成功了。这是因为它的成功需要因特网形成的全球性社区，而在前两次尝试的时候，全球性的数据社区尚不存在，因此它无法得到大量的访问。可见，时机很重要！

4. 经费

想赚到一百万，就得投入一百万，是不是？一般来说都是这种情况，不过午夜电视剧里的故事要除外。如果你相信那种故事的话，我这里有一本书，它教你如何让一个完全陌生的人给你50美元。我可以把它卖给你，只收你47.95美元外加运费和手续费。

我认为缺乏经费是导致许多伟大的产品未能面世的众多原因中最主要的一个。你必须冒某种经济风险。有一个方法就是OPM方法，即使用别人的钱（Other People's Money）。不幸的是，只有花言巧语的人才能让别人拿出钱来，因此你可能只有靠用信用卡借钱或者靠花光你的积蓄来操作。赚钱的方法有很多，但要把自己的点子推向市场却需要花钱！

5. 市场

你必须售卖你的产品，产品要有人卖才会有人买。这就需要市场。在此无需多说。

但实际却需要我再多说几句。我原以为这是十分简单的道理，然而当初在我开始做点生意，替人把产品推向市场的时候，却发现这往往是做成一门生意中最容易被忽视的部分。

若是没有商业广告片、商店或其他途径让世界知道你的产品的存在，那么即使你做了一个比别人更好的老鼠夹，这个世界也不会自动开出一条大道通往你的门口。你自己需要做某种类型的一个销售员，来使自己的点子真正实现。如果没人买你的点子，你就不会有产品，你的点子就会成为另外一个烂在脑袋里的主意。专利库中满是老鼠夹子，不过你哪里都买不到。

6. 结论

好啦，你将成为下一个比尔·盖茨吗？去想出一种人人都需要的产品吧。然后找几个富有的亲戚来替你说说好话并投入几个钱，还有知道的人也让他们投点

钱。如果你的时机选得对头，也许就会成真。如果没有的话，我的那本书还可以卖给你。

经验法则

- 要有好的点子（这比较容易）。
- 考虑市场潜力。
- 应该工作正常。
- 寻求好的推手。
- 时机就是一切。
- 没钱不会成真。
- 最终还是为了卖掉。

附　录

在物理书上，我最喜欢的一个地方就是其内封页。所有有用的知识都被提炼成了基础，印在那里。本书也只有加上一个类似的部分，它才能算是完整的。

专用词汇

以下是一些你未必知道的术语——这些词汇在电子学中较为常用，而当非工程师们偶然听到电气工程师们的对话的时候，这些词汇往往会令他们产生疑惑。它们是一些密码，通常都比较短，以便提高效率。有时候工程师们会故意用这些词汇来为难老板（即便不是这样，老板也会疑惑他们到底在谈论什么）。我通过查找自己的"解密戒指"，看需要揭开哪些词汇的秘密，才能免遭手下工程师们的讥讽，因而选出了这些词汇。

AC——交流电流，流动方向来回改变的电流。从电线进入你房子的电力就是这种类型，可以从一般的电源插座得到。

Back EMF——反电动势（EMF指电动势）。这个术语用来描述我们旋转直流永磁电机的电枢时所产生的电压。也用来描述当停止给感应电机通电流时，其磁场消失过程中在接线端口上产生的电压。由于这两者都是由变化的磁场引起的，因此取这个名称是有道理的。

Bias——偏置。这是电子学中广泛使用的一个术语。偏置可以用来指加到电路上的一个电压。例如，DC偏置是一种这样的方法，它将AC信号从一个电平移动到另外一个电平，譬如偏置一个电路、偏置一个元件到某个电平，以便得到可以预期的结果。例如，你可以偏置晶体管的输入。

Bulk Cap——指大容量的电容，一般是1μF或更大，较常见的是100μF到0.1F。通常是电解电容，在高频下不怎么好，电流能力很大。

Cap——电容，一种碟片状的单元，碟片之间的空间里有不导电的某种材料。电容能够以电场的形式储存能量。

Chip——芯片，指代IC的俚语。你常会听到工程师把IC称为芯片。

Current——电流。电子的运动，常被想象成一种流动。用水来打比方的话，电流就像水的流量。电流的基本单位是安培。常用符号是*I*，有时也用A。

DC——直流电流，即仅往一个方向流的电流。从电池中流出来的电能就是这种形式。计算机以及大多数电器的内部电路都使用这种电能。

DCPM——直流永磁电机（direct current permanent magnet motor）的缩写，这个小东西处处都是。

DMM——该死的万用表测不了（Darn Meter won't Measure）。当数字万用表的熔丝烧了，工程师却找不出原因的时候，经常会放出来的一句咒语。这通常发生在跑去实验室找螺丝刀来拆开万用表，结果却只是需要替换保险丝之前。

Drain——漏，和“sink”（沉）有关。“漏”是器件上的一个连接，通过它电流“沉”到地中。

Drive——驱动。“驱动”一个器件意味着给该器件加电流和电压使其工作。你“驱动”一个负载时，如果问驱动能力是多大，这意味着问你它能够“沉”（消耗）掉多大的电流或者能够提供多大的电流。

Duty Cycle——占空比，或负荷率。指开通的时间所占的比重，或者说元件工作时间所占的比重。如果电机的负荷率是30%，这意味着它在30%的时间里是工作的，另外70%的时间处于停止状态。

EPROM——可擦写只读存储器（erasable programmable read only memory）。可以这样来想象这个器件，如果PROM上只保存有“E”，你就得用光把它擦掉。

EMI——电磁干扰（Electromagnetic interference）。就是干扰电流或电子电路的任何事物。有时迷信的工程师会把这类现象的原因归结为“超自然”的因素。

EULA——终端用户许可协议。如果这个产品损坏了你的数据，每个人都无法采取法律行动（Everyone is Unable to take Legal Action）。如果你从来没有同意过一个EULA，你就不会理解这个名词。

FAE——现场应用工程师（Field application engineer）。

Flux——助焊剂或松香，单独使用或位于焊丝中央。在加热时，它使焊点清洁，以帮助焊锡粘结牢靠。

Forward Bias——正向偏置，用于二极管。正向偏置是二极管通过电流的状态。

Freewheel Diode——续流二极管。这是一个反向偏置的二极管，它并联在电机的两端。在磁场衰减时，它用以捕获感应电流。

Gnd, V_{ss}——电压参考点。通常你需要把测量仪器的一个探针连接在这个点上。它也是所有来自V_{cc}的电流返回的地方（传统电流定义）。如果按电子流来看，它就是喷出电子的地方。

Ground——地。尽管常常可以同电路的Gnd交换使用，但“地”应该看成是

不同的事物。地是你脚下踩的泥土，你在其中打入一个金属桩，把你电路的暴露部分（有时是Gnd）连接在上面。这是为了安全起见。

HW——硬件（hardware）。

IC——集成电路。这种器件由大量的二极管、晶体管及其他的基本元件蚀刻到硅基上构成，用于生产从简单的开关到你的PC机中复杂的Intel奔腾4 CPU。

Impedance——阻抗。在许多方程中，你看到的是Z。可以将其看成是考虑了频率的一个电阻。用在有电感和电容的场合。

Inductor——电感。其最基本的样子就是一个金属线圈。它能够以磁场的形式来储存能量。当磁场变化时，会在线圈导线中感应出电流。当导线中流过电流时，其周围就有磁场，而当导线绕成线圈后，磁场就集中起来了。

Iron——用来产生焊点的电烙铁。

ISA——直觉信号分析（Intuitive signal analysis），我发明的第一个缩略语。我想如果我要成为一个著名的工程书作家，我就得发明一两个跟我的名字相同的缩略词。

Junction——结。两个半导体接触到一起的地方。

Ladder Logic——梯形（逻辑）图。一种编程方法或语言，其名称源于描述程序的方块图具有梯子的形状。

Lead——引脚。电子元件譬如IC上的针脚，用于连接到PCB板。

Leaky Cap——非理想的电容，其容许有少量的DC电流流过。

Linear——线性。常用来修饰“电源”或“控制”这两个术语。线性控制就是连续地对一个供电电压进行控制。实现线性控制的器件将消耗能量，其大小正比于自身的电压降及通过的电流大小。线性控制的电源是一种最低效的驱动负载的方法，因为其中未被利用的功率都转换成了热量。

Load——负载。它是需要消耗功率的一个事物，它既需要电流又需要电压来驱动。将电流从V_{cc}引到Gnd的电阻就是一个负载。

MAMA——MAMA（Management Always chasing the Market Around）法则。我自创的缩略语。如果你想在工程界成功，你就必须发明一两个缩略语。这是我发明的第二个缩略语。

MCU——微控制器。类似CPU，其中集成的功能比CPU更多，但运算功能不如CPU强大。

NO, NC——常开、常闭。发音为nnn ohhh和nnn seee，这是开关或继电器的两种正常连接状态的缩略语表示。你看到了吧，即使在工程界，No也不总表示“不”。

OS——操作系统。

OTP——一次性可编程（存储器）（one time programmable）。在闪存尚未被应用到嵌入式微控制器的时代，嵌入式微控制器的存储器只有一次编程机会。现在仍有一些这样的器件在出售，若使用这种器件，你也许可以得到较大的存储器容量，因为这时你也许可以用到在闪存模式下被屏蔽掉了的部分存储器。

Pad——焊盘。PCB板上裸露出来的由铜构成的小圆圈，这里是元件的引脚通过焊接方式连接到走线上的地方。

PCB或PWB——印刷电路板（printed circuit board）或印刷线路板(printed wiring board)。这是一种复合材料，往往像板一样坚硬，上面布置有电路，以将元件连接在一起。

PLD——可编程逻辑器件（programmable logic device）。上面有大量的存储单元，大量的逻辑门，还有大量的多路复用开关，以及一个对这一切进行配置的方法。它们全部塞满在一个IC上。在你完成了你该做的所有工作之后，你就把它做成了一个产品，它可以承担大量的状态机和逻辑处理的工作。你甚至可以利用PLD制作出MCU来，不过采用其姐妹产品FPGA的情况比较多见。

PM——永久磁铁（permanent magnet）。

Pointy Hair——“竖发”，用于指我们的老板。这得感谢Scott Adams，感谢他创造的这个独特的呆伯特形象。

Power——功率。电压和电流的乘积就是功率。是它点亮了你房间里的灯泡。功率的单位是瓦特，其常用符号是W。瓦特可以转换成hp（马力），1hp等于746W。跟瓦特有一定关系的另外一个单位是VA或伏安。这是在AC供电系统中用来表示交流容量的一个符号。只有当电流和电压同相位时，VA才等于W。

Power Component——功率部件。这个术语常用来指一个器件需要处理很大的电流或很高的电压。当然“大”和“高”等词语都是相对的。这意味着电流大得你必须考虑发热等问题了，电压高得在你碰到它时不再是搔痒那么简单了。

Power Device——功率器件。这个术语常用来指FET和晶体管等半导体器件，它们将输入端较小的低功率信号（弱电信号）进行放大，变成高功率信号（强电信号）。在你的设计里，必须对功率器件进行小心处理，以防止过热。它们往往有一个特别设计的外表面，以便能够和一个散热器配合，来处理其运行时消耗的功率。

Pull-Up——上拉（电阻）。这是在器件的输入线（节点）和V_{cc}之间的一个电阻。在没有其他电流路径的情况下，它会将节点的电压“上拉”到V_{cc}。

Pull-down——下拉（电阻）。这是在器件的输入线（节点）和Gnd之间的一个

电阻。在没有其他电流路径的情况下，它会将节点的电压“下拉”到Gnd。

PWM——脉宽调制，控制电压大小的一种数字化方法。其中，导通时间与断开时间的比值决定着负载所能获得的电压。

R——电阻。发音为arrrrr，就如未满周岁的小狗发出的声音。它是阻碍电流流动的一种性质（电压与其成正比，电流与其成反比）。就是欧姆定律中的“R”。

Rail——轨。输出能够摆动的电压极限。上轨是能够到达的最高正电压，下轨是能够到达的最低电压。这不一定跟电源相同。有些器件无法达到电路中的V_{cc}和Gnd。当输出达到这些极限时，常称为满幅的或到轨的。

Rectify——整流。将AC功率转变成DC功率的过程。

Reverse Bias——反向偏置，是偏置的一种特殊情况，通常用于指二极管的一种状态。当二极管（或者元件中的二极管类型的结）反向偏置时，二极管使电流阻断。

Sink——沉，宿，吸入，流入。这不是厨房的“地漏”（Sink），但它的作用类似一个地漏。这常用于这样的问题中，例如“那个可以吸收多少？”这是指那个器件能够将多大的电流流入到地。

Solder——焊锡。用于电气连接的一种材料。它被加热时可以将电路连接起来。

Source——源，流出。这通常用在这样的问题中，例如“那个可以流出多少？”这通常是问从那个元件能够流出多大的电流。沉和源都采用传统的电流方向定义（即从正极流到负极）。

Sparky——“点子王”。广泛使用的俚语，指电气工程师，至少在我的习惯中是如此［我们也试图用“Wrench”（扳手）来称呼机械工程师，但影响不那么大］。

State Machine——状态机。这是一种计算器件，它查看输入状态，来决定输出。在较复杂状态机中，还会将输出反馈到输入，并维持（或记住）某些输入状态。

SW——软件（software）。

Switcher——开关电源控制器。它是线性控制器（或线性电源）的一个近亲。开关控制本质上是数字的。在这种系统的某个地方有一个开关，它周期性地将功率开/关到负载。开通时间占一个周期的比值称为占空比，用百分比表示。通常有一个感性或容性器件位于（或接在）负载上，以滤除开关器件的高频分量，使输出到负载的电流或电压平滑。

Switch Mode——开关模式（控制），例如，晶体管或FET等器件的数字控制。

在开关模式中，相应的器件要么完全导通，要么完全断开，就像一个开关一样，因此称为开关模式控制。在开关电源一类的应用中，这样使用器件可以得到更高的效率，因为当器件不在线性工作区运行时，会产生较少的发热。

Threshold——阈值。在电子学中，阈值是一个电平。在逻辑电路中，一旦过了阈值，输出的状态就会从1转变到0（或相反）。

Tinning——上锡。这是指在电烙铁头或导线上加焊锡，以帮助传热。

Trace——走线。这是在PCB板上看到的绿色线条。它们由铜构成，将元件连接在一起。此外，动词的Trace是“跟踪”的意思，用以指软件的故障排除方法。

V_{cc}, V_{dd}——电路中的电压源。在使用传统的电流方向定义下，这些都是正电荷的空穴出来的地方。而在采用电子流术语时，这些地方是电子试图进入的地点。

Via——过孔。是PCB板上的一个孔，在某些PCB板上，过孔是覆了铜的。它有两个用途，或者用来在上层走线和下层走线之间建立一个连接，或者是将元件的引脚插入到过孔，以便焊接到PCB板上。

Voltage——电压。可得到的电子的能量。用水来打比方的话，就是使水流流动的压力。电压的单位是伏特。常用的符号是U和E。

参考文献

人人都会从大量的资源中去学习，而我要说的是，我呈现给大家的这些工程基础都是源自我自己的一些认知和见解，当然我看了大量的书，它们帮助我获得了这些见解。通常，这些书在具体的问题上要比我钻研得深得多，因此它们也许对你有用。以下是这些书的清单，我加了点评论，以帮助你决定是否该读一读。

黄皮控制书：*Fundamentals of Automatic Control*, by Robert C. Weyrick, McGraw Hill, ISBN 0-07-069493-1. 容易读，帮我理解了控制理论。

DC Motors Speed Controls Servo Systems——由于其选择了很有意思的粉红颜色作封面，所以我喜欢称其为红皮电机书。对于那些与DC电机打交道的人，我强烈推荐这本书。它有很多公式，但它是理解电机的各种复杂性的一个好材料。（红皮电机书：*DC Motors Speed Controls Servo Systems, The Electro-Craft Engineering Handbook*, by Reliance Motion Control, Inc.）

Grounding and Shielding Electronic Systems, by Dr. Tom Van Doren, University Missouri Rolla, Van Doren Company, Rt 6 Box 319, Rolla, Mo 65401, Ph 314-341-4097.

Intuitive IC Op Amps,by Tom Frederickson. 这个经典的平装本原版于1984年。本书从实用、常识的角度，描述了运放如何工作，如何使用。本书目前已经绝版。然而，你也许可以在一些大学的图书馆里或因特网上找到。在2005年3月以前，也可以从Rector Press买到本书。本书由世界上最广泛使用的运放LM324的发明者撰写。是本书给了我第一个提示：运放应该容易使用，而不应该难于使用。

有用的网站和杂志

以下是一些也许对你有用的网站：

www.epanorama.net：ePanorama.net是一个致力于提供从互联网上搜罗来的电子电路信息的网站。

www.circuitcellar.com:“Circuit Cellar”杂志的网站。

后记

好啦，作为一个工程师和经理，我所学到的所有知识都已经被提炼成了这几十个经验法则，我希望它们会对你在电气工程世界中的旅程有所帮助。也许某个地方的某个人会问，“那……定律怎么没有呢？我可是天天在用呀！”喂，第二版用来干什么的呢？如果本书反映良好的话，也许在第二版中将会多几条法则。

我希望你喜欢它，我希望它有帮助，最重要的是，我希望这些法则能够将你带向成功。

［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
ＳＳ号＝１２０８９４１４
书名＝电子电气工程师必知必会
页数＝２２３
作者＝（美）ｄａｒｒｅｎａｓｈｂｙ著
出版社＝人民邮电出版社
出版日期＝２００９．０１